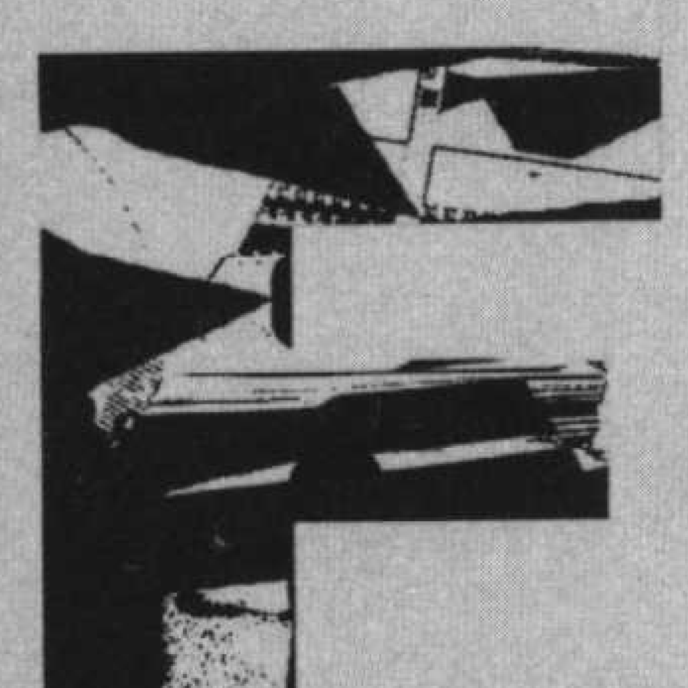
研究生系列教材

FRONTIER TOPICS IN PHYSICS

物理学前沿问题

王顺金 著

四川大学研究生教材建设基金重点资助项目



FRONTIER TOPICS IN PHYSICS

物理学前沿问题

王顺金 著



四川大学出版社

内容简介

本书简要介绍物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括：物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学．对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与 21 世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙论，则探讨了 21 世纪物理学基本理论可能面临的重大变革．此外，还简要地介绍了物理学与信息论和计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括：量子信息、量子通讯与量子计算，生物物理学．最后，介绍了物理学的研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及中国物理学的发展前景．本书对所讨论的问题提供了实用的数据与资料，其中包含了作者本人对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法．

作者著述本书的目的是：①开阔本科高年级学生和研究生的物理学视野，使他们对物理学的各个前沿问题有一些初步的了解，以便于今后选择适合的研究或工作领域；②给学生今后的学习与研究提供一个向导；③激发学生对物理学，特别是对基础物理学和理论物理学的热情，鼓励他们从事物理学教学与研究工作，为发展中国和世界的物理学做出贡献．

本书适合物理学各专业的研究生、本科高年级学生和研究人员阅读，也可供相邻学科的学生和研究人员参考．

序

“年年岁岁花相似，岁岁年年人不同。”在世纪之交，经过高教体制改革，又一次强强合并后的新四川大学已成为我国西部地区规模最大、学科门类最齐全的新型综合性研究型大学。校训“海纳百川，有容乃大；严谨勤奋，求是创新”已成为川大人求知治学的座右铭。

作为新世纪的献礼，我校研究生教材建设基金资助的又一批研究生优秀教材相继正式出版了，在此我表示热烈的祝贺。

众所周知，21 世纪是知识经济的世纪，国际竞争空前激烈。竞争的焦点是科学技术，竞争的核心是创新型人才，竞争的关键是国民教育。对于四川大学这样的国家重点大学而言，必须注意大力发展研究生教育，扩大规模，注重质量，强调创新。

校长、教师、教材是办学的三大要素，而教材是教学改革与师生智慧的重要结晶。正是基于这种思考，我校建设以学科建设为龙头，作为一项重要的措施就是加强研究生的教材建设。我们通过各种渠道，筹集了专项基金，用以资助研究生优秀教材的编写和出版。我们在 1999 年首次资助的是有博士学位授权点的学科专业中涉及面大、使用面宽的研究生学位平台课程的优秀教材。而今，我们扩大了教材基金资助的范围，无论文、理、工、管、医，只要是经过专家评审后认定的优秀教材，都可被列为资助对象。特别是社会需求量大的应用学科、新兴学科、交叉学科及保护学科的优秀教材，更是优先资助出版。

我们推出的研究生教材的基本特点是：符合该学科教学大纲的基本要求，有较强的理论性和系统性。这些教材既反映了该学科发展的新知识、新动向、新成就，也反映了我校教师在该门学科教学与科研中的新成果与新经验。

前人说得好，古今之成大事业、大学问者，都必须经过三种境界：“昨夜西风凋碧树。独上高楼，望尽天涯路。”此第一境界也。“衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴。”此第二境界也。“众里寻他千百度。蓦然回首，那人却在，灯火阑珊处。”此第三境界也。研究生优秀教材的建设应该算作一种“大事业”。优秀教材的作者们对于研究生教育改革的执著追求，令人钦佩；他们的无私奉献精神，值

得赞扬；他们所取得的教学科研成果应该积极推广，使其产生应有的社会效益，为百年名校增添光彩。我殷切希望在陆续出版的研究生教材中能出现“传诸后世”的佳作，更希望我校有更多教授、名家动手撰写研究生教材，分门别类，出版系列的研究生教材丛书，为建设国内一流、国际知名的新四川大学做出更大的贡献。

中国科学院院士
四川大学副校长　　刘应明　教授
四川大学研究生院院长

前　言

物理学研究自然界最深奥的规律，揭示自然界最深层次的美．凡是喜欢对大自然寻根问底的人大都喜欢物理学．

物理学和数学一起，奠定了自然科学的基础，又和各门自然科学一起成为现代技术的基础．

20世纪被人们誉为物理学的世纪．物理学很可能与信息科学和生物学一起分享21世纪．

物理学以她展示出的深奥的自然之美和她对人类的无私奉献，获得了人类的尊重，吸引了众多学子为之献身，出现了像牛顿和爱因斯坦这样的千秋科学伟人，铸造了小至基本粒子，大至宇宙的精确的、震撼人心的科学知识．

本书简要介绍物理学各个主要分支的研究现状、前沿问题和发展趋势，包括：物理学与高科技，凝聚态物理学与介观物理学，原子、分子物理学与光学，原子核物理学，基本粒子物理学与量子场论，广义相对论、天体物理学与宇宙学．对凝聚态物理学和原子、分子物理学与光学，强调了其新发现和新进展与21世纪高科技的密切联系；对原子核物理学、基本粒子物理学、广义相对论、天体物理学与宇宙论，则探讨了21世纪物理学基本理论可能面临的重大变革．此外，还简要地介绍了物理学与信息论和计算机科学，物理学与生物学的交叉，包括：量子信息、量子通讯与量子计算，生物物理学．最后，介绍了物理学的研究方法，物理学、数学与哲学的相互关系，以及21世纪物理学的发展前景．本书对所讨论的问题提供了实用的数据与资料，其中包含了作者本人对物理学基本问题的观点和研究心得，以及对物理学发展前景的看法．

作者著述本书的目的是：①开阔大学本科高年级学生和研究生的物理学视野，使他们对物理学的各个前沿问题有一些初步的了解，以便于今后选择适合的研究或工作领域；②给学生今后的学习与研究提供一个向导；③激发学生对物理学，特别是对基础物理学和理论物理学的热情，鼓励他们从事物理学教学与研究工作，为发展中国和世界的物理学做出贡献．

本书适合物理学各专业的研究生、本科高年级学生和研究人员阅读，也可供相邻学科的学生和研究人员参考.

本书凝聚了我的亲人、同事和学生的心血与劳动. 我的妻子郭开惠始终热情、耐心地支持我的教学、科研工作，她在繁忙的教学工作之余，帮助我打印了许多章节；学生们对各章节提出了许多好的改进意见，并帮助绘制图表；四川大学研究生院、物理科学与技术学院和物理系的领导对本书的出版给予了热情的关心、帮助和支持；四川大学出版社则热情、细致地组织了出版工作. 我在此对他们表示深切的感谢.

由于作者水平有限，书中的错误与不妥在所难免，望读者不吝指出.

王顺金

2004 年 8 月于四川大学望江校区

王顺金

男，四川大学教授，博士生导师，中国高能物理学会理事，《高能物理与核物理》、《原子核物理评论》编委。曾任美国加州大学伯克利分校顾问，橡树岭国家实验室、德国重离子研究所、马克斯-普朗克核物理研究所等机构客座教授。专著三部，论文200余篇（SCI 100余篇）。创立了原子核多体关联动力学、物理系统的代数动力学和代数动力学算法。获全国科学大会重大成果奖两次、国家自然科学三等奖两次、国家教委普通高校优秀教材一等奖一次、教育部科技进步一等奖一次、二等奖三次、国防科委战略武器与尖端科技成果奖一次。被评为“国家有突出贡献的中青年专家”，“四川省学术带头人”。

目　　录

第 1 章　物理学与高科技

本书的写作目的，是给大学物理学本科高年级学生和研究生介绍 20 世纪物理学发展的概貌，21 世纪物理学发展的趋势和某些前沿研究领域；唤起他们对物理学的兴趣和爱好，使他们认识到物理学家的社会责任与科学使命，以及当代物理学家所面临的挑战与机遇；鼓励物理学本科学生和研究生热爱物理学，学好物理学，献身物理学，将来为物理学与高科技的发展做出贡献．

1.1　21 世纪的高科技与知识经济

科学技术与社会经济密切相关，物理学更是如此．对物理学发展的前沿问题的讨论，应当放在社会经济发展的背景下来考察．

1.1.1　知识经济时代

人类社会大体上经历了三个经济时代，它们是：

(1) 漫长低级的农业经济时代．这一时代的持续时间大体上是公元前 5000 年至公元 16 世纪．其特点是：社会经济主要依赖于自然界的养殖业与农业；生产力水平低下，经济的区域性较强；社会生产对自然环境的破坏小，人与自然和谐发展．这一经济时代的成就是造就了古代文明．

(2) 高速增长的工业经济时代．这一时代的持续时间是 17 世纪至 20 世纪．其特点是：社会经济以蒸汽机、内燃机、电力为动力，以机械工业为骨干，以自然资源为原料；生产力高度发展，生产社会化与全球化的程度很高；社会生产对环境的破坏很大．这一经济时代的成就是造就了现代文明．

(3) 科学合理的知识经济时代．这一时代可以认为从 21 世纪正式开始．其特点是：整个社会的生活和生产均以知识为基础，科技知识和人文知识及其相应的信息支撑着社会经济生活中的生产、流通、管理、分配、消费等各个环节；劳动者熟练地运用高科技知识，知识本身成为产品、商品；自然资源得到合理的利用，生产和经济保持可持续发展；生产和经济真正实现全球化；在社会生产和生活中，强调对地球环境的保护，实现社会、人与自然的和谐发展．

1.1.2 支撑知识经济的高科技

以知识为基础的经济，需要高科技的支撑．从近期和可预见的未来看，以下高科技将对知识经济的形成和发展起比较大的作用．

(1) 信息科技：知识经济的发展将伴随着社会信息化时代的到来，而社会信息化是以计算机技术、数字技术、通讯技术和电子网络技术为基础的，所有上述技术又是以物理学和数学等自然科学为基础的．

(2) 生物科技与基因工程：知识经济的另一个特点将是生物科技与基因工程在社会经济、人类生产和生活、保健和医疗以及环境保护等方面发挥空前重要的作用，其中转基因技术与克隆技术将对人类的生活产生难于想像的影响．

(3) 微米机电系统（MEMS）与纳米机电系统（NEMS）：作为人类的肢体、感官和思维的延伸的机械工业，正朝着小型化和集成化的方向发展，微米机电系统与纳米机电系统将把机器的感觉功能、分析功能和执行操作功能集成为一体，在微米甚至纳米的尺度上制造具有复杂功能的机器，为人类完成各种各样难于想像的任务．这些小巧的智能机器，是数学、物理、化学、材料、机械、电子与计算机、信息与通讯等科学技术互相渗透与综合的产物．

(4) 人造功能材料：人类将结束依靠自然界恩赐的天然材料的时代，凭着自己的聪明才智和创造能力，在物理学、化学、生物学、材料科学和计算机科学等科学技术的指导下，按照自己的需要设计和制造自然界所没有的具有多种功能的新型材料．

(5) 宇航科技：知识经济将孕育空前发达的宇航科技，使人类向广阔宇宙进军和普通人遨游太空的梦想成为现实．宇航科技显然是建立在数学、物理、化学、机械、电子与计算机、材料、通讯、生物与医学等科学技术的基础之上的．

1.1.3 21世纪的高科技需要教育去培育

21世纪的高科技需要长期的、全面的和全民的教育去培育，这就要求普及中等教育与高等教育，加强职业技术教育和终身教育，在此基础上实现基础研究、应用研究和技术开发的创新，为高科技和知识经济的发展提供坚实的科技支撑和丰富的人力资源．

1.2　21 世纪的高科技与物理学

1.2.1　20 世纪的高科技与物理学

对于 20 世纪的物理学与社会的关系，人们达成了以下共识：20 世纪是物理学的世纪．这一共识，来自于有目共睹的物理学对高科技的影响和对提高社会生活品质的贡献．

1.2.1.1　基于相对论和量子论的物理学的各个分支学科的发展产生了 20 世纪的新技术

核物理与粒子物理导致原子弹和氢弹的出现，以及核能与核技术的发展；半导体物理导致晶体管、集成电路、计算机的出现，以及信息与通讯技术的发展；量子光学是激光技术、光学通讯、光学工程的科学基础；原子分子物理、材料科学、量子化学导致人工新材料的产生；天体物理学与宇宙学是宇航科技的科学基础，它们导致了新的宇宙观的形成．

1.2.1.2　20 世纪的物理学促进了其他学科的发展

(1) 化学：物理学促进了量子化学、化学热力学和化学反应动力学的发展；物理学的方法、仪器与探测技术在化学中得到了广泛的应用，使化学研究发生了质的飞跃．

(2) 生物学：物理学与生物学相结合，产生了生物物理学、量子生物学等交叉学科；物理学的方法、仪器与探测技术在生物学中得到了广泛的应用，使生物学逐步成为精密的、定量的科学．

(3) 数学：广义相对论、量子论促进了非欧几何、泛函分析和希伯特空间理论、微分几何与纤维丛理论、拓扑学、量子群、非对易几何等数学分支的发展，计算机的出现还使机器证题和计算数学得到空前发展．

1.2.2　21 世纪的高科技与物理学

1.2.2.1　21 世纪物理学的地位

21 世纪物理学的地位应从两个方面去考察．

(1) 物理学在自然科学群体中的地位．这是由自然科学群体的知识结构决定的，是长期的、稳定的．在自然科学群体中，物理学处于基础和领导地位．

这一观点会招致来自其他学科的争议．对这些争议的回答是：①对于数学：首先，数学本身不能回答其自身的数学形式逻辑体系的客观真实性问题，数学形式体系的客观真实性要靠物理学去认证．其次，数学的发展有两个动力，即数学内部逻辑发展的动力和外部的物理学等学科的需要与直观的动力．正是这种外部物理学的需要与直观的动力，使 Witten 和 Donaldson 发展了现代数学，并因此获得了费尔兹奖；而量子论则导致非对易几何学的出现，超弦理论则导致新的数学观点的产生．然而，数学是伟大的，她像语言一样，是人类进行交流和表达思维的工具，对于现代科学技术，她更是不可或缺的工具．②对于化学：量子力学和统计热力学是表述化学定律的基础，现代化学则在理论上离不开量子力学，在实验上离不开现代物理学测量技术．③对于生物学：量子力学和量子统计是在分子层次上认识生命现象的基础，生物物理学使生物学更定量、更精确．

综上所述，物理学在自然科学群体中的领导地位是长期的、不可否认的．

(2) 物理学在社会上的地位．物理学在社会上的地位是由物理学对社会的贡献决定的，而且是物理学对社会的新的贡献决定了其现实社会地位，这一地位是变化的．物理学的社会地位主要是指政府和民众对物理学的重视程度（在物质上和精神上对物理学的支持）．

1.2.2.2 21 世纪的高科技与物理学

预期 21 世纪的高科技与物理学有如下的对应与关联：

预期的高科技	与之关联的物理学及其交叉学科
信息技术	介观物理、量子信息
聚变能源	等离子体、强激光物理
功能材料制造	原子分子物理、凝聚态物理
MEMS、NEMS	纳米科技、介观物理
基因工程	量子化学、量子生物学
宇航与太空开发	相对论、天体物理

1.2.3 21 世纪物理学家的责任

21 世纪物理学家对科技发展的社会责任主要包括：

（1）为知识经济所需的高科技提供物理学支撑，注重与物理学有关的新技术的开发.

（2）在物理学基础研究和应用研究中创新.

（3）注重物理学与其他学科的交叉发展.

1.3　21 世纪物理学的前景与可能面临的变革

1.3.1　20 世纪物理学的现状与发展趋势

为了考察 21 世纪物理学的发展前景，对当前物理学的现状与发展趋势做一个简要的描绘是有益的，表 1-1 提供了一个可能的估计.

表 1-1　当前物理学现状与发展趋势

成熟的	发展中的	趋　势
相对论（狭义与广义）	超引力	量子引力，超弦?
量子力学	人造系统的量子力学 量子信息与量子计算	
量子场论与粒子物理（标准模型）	大统一理论	四种力的统一（超弦?）
常规核物理	极端条件下的核物理	基于 QCD 的核物理
常规凝聚态物理	极端条件下的凝聚态物理、介观物理、团簇物理	基于 QED 的凝聚态物理、介观物理、团簇物理
常规原子分子物理	极端条件下的原子分子物理	基于 QED 的原子分子物理
大爆炸宇宙学	标准宇宙学模型的发展	量子宇宙学（超弦?）

1.3.2　21 世纪物理学的前景与可能面临的变革

目前，人们对物理学的发展前景有两种看法.

（1）悲观的看法：认为人类对物理学基本规律的认识已经完成，基础物理学的发展终结了.

（2）乐观的看法：认为现代物理学仍然是不完备的，物理学的内在矛盾

(相对论与量子论的矛盾）表明21世纪的物理学需要而且必然面临再一次深刻的变革.

J·霍根在《科学的终结》一书中得出的“物理学以及自然科学终结”的结论，是悲观看法的典型代表，其论点如下：

(1）基于相对论和量子论的标准模型的建立标志着物理学的终结.

(2）化学只不过是原子、分子的量子力学，物理学的终结意味着化学的终结.

(3）基于广义相对论和粒子物理学的大爆炸宇宙论的建立标志着宇宙学的终结.

(4）基于基因和分子水平的进化论和DNA双螺旋结构的发现标志着生物学的终结.

(5）各门自然科学的发展受阻、减速，是科学老化、行将终结的表现；基本规律的应用和生产技术会有大发展，但关于基本规律的科学终结了.

对上述观点的批评构成乐观看法的基本论点：

(1）准模型揭示了基本粒子现有层次的基本规律，标准模型的缺陷和内在矛盾暗示物质下一更深层次及其基本规律的存在；对称性的丢失、夸克禁闭、基本粒子的三代、质量和电荷的起源等问题只能由更深层次的理论来解决.

(2）大爆炸宇宙论并不是完备的，类星体、暗物质与暗能量以及黑洞内部的性质，仍不能解释.

(3）分子进化论和DNA双螺旋结构并未穷尽生物学的基本规律，遗传密码及其表达以及神经活动的基本规律仍未揭示出来.

(4）自然界有纵深的规律，也有横向（多体系统）的规律，由于物质及其层次的无限性，这两方面的基本规律形成无限的序列.

(5）就现有物质层次而言，相对论和量子论只揭示了基本规律的三分之二，另一项基本规律仍有待人们去揭示，这同样是激动人心的.

基本物理常数与基本物理理论的对应预示着物理学基本理论将面临重大变革：

(1）光速导致相对论（导致时空观的变革).

(2）普朗克常数导致量子论（导致运动学的变革).

基本物理常数的完备性要求另一基本物理常数和另一基本理论.

(3）基本长度（质量）l（m_0）导致什么理论?（导致动力学的变革?)

1.3.3　21 世纪的物理学家将要面临的挑战与机遇

21 世纪的物理学家将要面临两方面的挑战与机遇：

(1) 知识经济的高科技提出的物理科技问题.

(2) 物理学基本理论面临重大变革.

1.4　大学本科物理学和数学的知识结构

作为物理学科的本科生和研究生，了解大学本科的物理学和数学的知识结构，对于主动规划自己的学习是有益的. 大学本科的物理学和数学的知识结构可以总结如表 1-2 所示.

表 1-2　大学本科物理学和数学的知识结构

		经典物理	量子物理	教学目标
物理	普通物理	力学与声学 热学 电磁学与光学 相对论	原子与核 基本粒子	侧重经典与实验物理
	四大力学	经典力学 统计热力学 电动力学	量子力学 量子统计 量子场论 核理论与粒子理论	侧重量子与理论物理
数学	高等数学	初等函数论 线性代数 解析几何 微积分		为普通物理学服务
	数学物理方法	复变函数 数理方程 特殊函数	广义函数与泛函分析 近世代数与群论 微分几何、纤维丛、拓扑学	为四大力学和 理论物理学服务

上述课程的基本内容及其相互配合与相互联系如下：

(1) 普通物理学侧重于经典物理的实验现象与实验定律的讲授，而四大力学则侧重于量子物理和物理定律的理论表述. ①力学通过机械运动揭示出

能量-动量守恒这一普遍定律，力学定律的牛顿形式是能量-动量守恒定律的微分形式；而经典（理论）力学则提高与发展了牛顿力学，建立了力学的理论体系和力学定律更普遍的各种形式（如哈密顿-泊松形式、哈密顿-雅科比形式、拉格朗日形式等）. 牛顿力学是非相对论的，其相对论化成为相对论力学；相对论则描述了真空背景对尺钟的影响，把平稳真空背景的尺钟效应及与其共轭的运动学效应带进了物理学. ②热力学介绍了温度、能量守恒、熵增加、真空零点运动效应等宏观热力学量（函数）与定律；而统计热力学则从力学定律和统计系综出发，从微观上阐明了这些定律. ③电磁学用积分的形式介绍了电荷产生电场，运动电荷（变化的电场）激发磁场，变化的磁场激发电场等电磁规律；而电动力学则用马克斯威尔方程概括了这些定律，给出了电磁定律的微分形式，统一了电磁学与光学. 电动力学和马克斯威尔方程本身就是相对论性的. ④量子力学讲述微观世界的全新的力学，量子化规则及原理把经典力学变成量子力学，把经典统计变成量子统计，把经典场论变成量子场论. 量子化原理把真空涨落效应带进了物理学. 量子场论概括了真空背景的两种效应，即平稳真空的尺钟效应和涨落真空的量子效应.

（2）高等数学主要是为普通物理学服务的，数学物理方法则主要是为四大力学服务的. ①波的振幅和相位的独立性，要求用复变函数进行描述，复变函数的产生是描述物理定律的需要. ②统计热力学的热传导方程、电动力学的马克斯威尔方程、量子力学的薛定格方程等数学物理方程的求解，产生了特殊函数.

大学本科课程提供了最基本的物理、数学基础理论知识，但尚未深入到物理学的各个分支，更未达到物理学研究的前沿. 研究生教育则要求深入到物理学的各个分支，达到物理学研究的前沿.

设置本课程的目的就是要尽可能全面地介绍物理学研究前沿的基本轮廓.

【参考文献】

1 路勇祥. 创新与未来：面向知识经济时代的国家创新体系. 北京：科学出版社，1998

2 张礼. 近代物理学进展. 北京：清华大学出版社，1997

3 P. Black，G. Drake，L. Jossem 著，赵凯华等译. 物理 2000：进入新

千年的物理学．北京：北京大学出版社，2000
4　J·霍根．科学的终结．呼和浩特：远方出版社，1997
5　美国国家科学院编著．科学前沿：第Ⅰ，Ⅱ卷．国家自然科学基金委员会，1993
6　21 世纪 100 个科学难题编写组．21 世纪 100 个科学难题．长春：吉林人民出版社，1998
7　王顺金．高等量子论与量子多体理论．成都：四川大学出版社，2004

第2章　凝聚态物理学与介观物理学

凝聚态物理学是物理学最大的分支领域，也是与高科技和日常生活关系最为密切的领域．凝聚态物理学是物理学中历史悠久的学科，也是蓬勃发展、充满生机、不断有新发现、不断出现新的分支学科和交叉学科的领域．凝聚态物理学是固体物理学的发展和延伸，它包含许多分支和丰富多彩的内容．

2.1　凝聚态物理学的现状

2.1.1　凝聚态

凝聚态是粒子数 $N > 1.0 \times 10^{23}$的原子、分子、离子集合体的总称，其中包括：

（1）固体：晶体、准晶体、非晶体都属于固体，其特点是原子（离子）之间有固定的平衡位置，由相互作用凝聚成整体，密度较大．

（2）液体：包括常规液体和有序液体（液晶），其特点是原子（离子、分子）间在一定范围内可相对运动（流动），但相互作用把它们凝聚成整体，密度中等．

（3）气体：包括中性气体、电离气体（等离子体），其特点是粒子之间有很大的距离，可自由运动，靠外场或容器的约束而非粒子间的相互作用形成凝聚体．

2.1.2　凝聚态物理学

凝聚态物理学是研究凝聚态的电磁、光学、热学、力学等性质，揭示其规律并加以利用，创造和利用新的凝聚态的科学．

2.1.3　凝聚态理论

凝聚态理论用基于量子电动力学（QED）的量子多体理论计算凝聚态的电磁、光学、热学、力学等性质，揭示其规律，从而设计具有所需性质的新的凝

聚态.

凝聚态理论的发展经历了气体分子运动论、Fermi 气体理论、液体理论(Fermi，Landau)、流体动力学、固体量子论，并最终进入了凝聚态理论的现阶段，其中以固体量子论和晶体量子论最为成熟. 下面对晶体量子论作简要介绍.

具有周期性点阵结构的固体叫做晶体. 晶体量子论研究各种波在具有周期性点阵结构的固体——晶体中的传播规律，包括：

(1) 弹性波在晶体周期点阵中的传播规律，即晶格动力学；声波在晶体周期点阵中的传播规律，即声子晶体的性质.

(2) X 射线电磁波在晶体周期点阵中的传播规律，即 X 射线衍射动力学；光波在晶体周期点阵中的传播规律，即光子晶体的性质.

(3) 电子物质波在晶体周期点阵中的传播规律，即电子能带论.

晶体量子论的发展在以下三个方面进行：

(1) 从有序晶体到无序晶体. 研究各种波在超晶格、准晶体和无序系统(包含杂质的晶体) 中的传播.

(2) 从三维系统到低维系统. 研究各种波在二维量子阱 、一维量子线和零维量子点中的传播.

(3) 从大系统到小系统. 研究电子波在团簇 (如 C_{60}) 和介观环等介观系统中的运动.

(4) 从固体物理到一般凝聚态 (如液晶、等离子体、软凝聚态等) 物理.

2.1.4 凝聚态物理学的基本概念

凝聚态物理学的发展与这一领域的科学大师的贡献分不开，其中 Landau 与 Anderson 的贡献对凝聚态物理学的发展起着特别重要的作用. 他们的科研成果体现在凝聚态物理学的基本概念之中. Landau 发展了二级相变、超导、超流、Fermi 液体、序参量、对称性破缺、元激发等理论与基本概念. Anderson 在无序系理论、杂质磁性理论、软膜相变、Josephson 效应、超流、对称破缺、元激发、广义刚度、缺陷、标度性、重整化群等方面做出了重要贡献.

下面介绍凝聚态物理学的一些基本概念.

2.1.4.1 能带与化学键

能带与化学键体现了固体物理学与化学的联系.

能带：价电子为整个固体所共有（由巡游电子的非定域性所致）.

化学键：价电子定域在临近原子之间.

窄能带：价电子的定域－非定域相互作用的交织（包含新物理）.

2.1.4.2　相与序参量

相体现了物质结构的某种有序性，故称有序相，用不等于零的序参量来描述．序参量是相互作用导致的粒子之间的长程关联.

表 2－1 所示是一些固体的相及其相应的序参量的例子.

表 2－1　固体的相及其序参量

固体的相	序的名称	序参量
晶体	点阵序	晶格常数 $\vec{a}_i$
磁性	自旋序	磁矩 $\langle\vec{S}\rangle$
超导体	能隙序	能隙 $\Delta\neq0$
无序相	无序	序参量为零

2.1.4.3　相变与对称性破缺

相变与对称性破缺相联系，这是相变的深刻而准确的物理与数学描述，这种描述体现了凝聚态相变与粒子物理学的深刻联系．下面是有序相与对称性的例子：①高对称相：水、球、均匀系（非晶体，无磁性）；②低对称相：冰、椭球、非均匀系（晶体，磁性）.

相变：指由宏观条件改变引起的凝聚态的对称性的转变，即对称性的破缺（从高对称性到低对称性）与恢复（从低对称性到高对称性）.

临界现象：相变是对称性转变的过程，其间存在着剧烈的涨落，旧的长程关联的破坏和新的长程关联的建立，伴随着相变过程中的普适定律以及某些物理量发生突变，相变过程的这种现象称为临界现象.

为了更深入地理解物质结构的相与对称性的关系，表 2－2 列出了物理学中的一些基本对称性及其相应的不可观测量和守恒量．当对称性发生破缺时，相应的不可观测量变成可观测的序参量，而相应的守恒律遭到破坏．表 2－3 列举了对称性破缺现象.

表 2-2　物理学中的对称性

对称性及其变换	不可观测量	守恒量与选择定则
空间平移	绝对位置	动量
时间平移	绝对时间	能量
空间旋转	绝对方向	角动量
罗伦兹对称性	绝对运动	相对论能量-动量关系
空间反射	绝对左（右）	宇称
时间反演	无	无（过程可逆）
粒子置换	区分全同粒子	费米（玻色）统计

表 2-3　对称性破缺现象举例

现　象	破缺的对称性	高对称性	低对称性	序参量	元激发	广义刚度	缺陷
铁电性	空间反演	非极性晶体	极性晶体	P	光声子	铁电回滞	畴界
反铁电性	空间反演	非极性晶体	极性晶体	P 子晶格	光声子		畴界
铁磁性	时间反演	顺磁体	铁磁体	M	自旋波	磁滞	畴界
反铁磁性	时间反演	顺磁体	反铁磁体	M 子晶格	自旋波		畴界
超导电性	规范不变	正常金属	超导体	$\psi=\sqrt{\rho}e^{-i\phi}$	电子	超导电性	涡线
^{4}He 超流性	规范不变	正常液体	超流体	$\psi=\sqrt{\rho}e^{-i\phi}$	声子,旋子	超流性	涡线
向列液晶	规范不变	正常液体	取向液体	$\vec{d}$		取向弹性	向错
晶体	平移	液体	晶体	倒格矢	声子	刚度	位错

基本物理定律（系统的哈密顿量 $\hat{H}$（x_1，x_2，…，x_N）或拉格朗日 L）具有上述对称性，但系统的状态波函数 Ψ_n（$\hat{H}\Psi_n=E_n\Psi_n$）或密度矩阵 $\boldsymbol{\rho}$ 不具有上述对称性，这种现象称为对称性自发破缺.

有序相形成的物理根源有两类：①粒子-粒子相互作用，如 Wigner 晶体；②统计规律，如 BEC 和超导体（温度趋于零（基态））的玻色子凝聚相，不是相互作用造成，而是玻色子统计法则造成.

相互作用系统一般形成有序相，相互作用弱或无相互作用的系统也可形成无序相.

按照相变的唯象理论，自由能极小决定相的类型.

(1) 均匀系：自由能 F 按序参量 η 展为

$$F = E - TS,$$

$$F(\eta, T) = F_0(T) + A(T)\eta^2 + B(T)\eta^4 + \cdots.$$

其自由能极小确定均匀系的相，即 $\delta F = 0$ 确定均匀系的相 η 的值.

(2) 非均匀系：自由能密度 $f[\psi(\vec{r})]$ 极小确定非均匀系的相，即 $\delta_{\psi^*} f[\psi(\vec{r})] = 0$ 确定序参量函数 $\psi(\vec{r})$ 的方程的解→非均匀系的相函数 $\psi(\vec{r})$ (Landau - Ginsburg 理论).

2.1.4.4 系统的基态、激发态与热平衡态

基态：能量 E_0 最低.

激发态：激发能 $E_n > E_0$.

元激发：是低能激发态的基本量子，具有能量、动量（角动量）等类粒子的物理量，是单粒子激发概念的推广.

元激发的类型：有费米型（F 型）与玻色型（B 型），单（准）粒子激发（多为 F 型），粒子对激发（Cooper Pair）（B 型），集体激发（电荷密度波，自旋密度波，声子等，可为 B 型或 F 型）. 上述激发为量子力学态，是纯粹系综.

热平衡态：是各种元激发的正则系综（量子统计态，混合系综）.

2.1.4.5 缺陷与广义刚度

缺陷：包括非线性激发和拓扑型激发，其特点是序参量奇异突变，如涡线、位错、畴界等.

广义刚度：指固体保持其有序相的完整性、抵抗缺陷在其中发生的强度. 缺陷要破坏序参量，自然会破坏广义刚度.

2.2 新有序相

2.2.1 金属氢

实验表明，在 1 个标准大气压下，氢的物态如下：

$T > 20.4\text{K}$ 为气体；

$T \leqslant 20.4\text{K}$ 为液体；

$T = 14\text{K}$ 为分子固体.

理论计算预言，在 4Mbar① 压力下，氢形成金属氢（在 17 万大气压下已制成金属碘）. 从经验物态方程知，金属氢的临界压强为：$p_c = 2.8\text{Mbar}$.

金属氢的性质：①属亚稳态（寿命很长）；②高温超导体，临界温度为 $T_c \approx 3000\text{K}$，具有新机制.

金属氢的产生与鉴定：通过高压实验产生，用光学和电阻测量鉴定.

研究金属氢的意义：①对于凝聚态理论，可用来检验能带论与物态方程. ②在天体物理中，木星含 40%的氢，压强为 100Mbar，可能存在金属氢. ③金属氢可用于制造高温超导体.

2.2.2 重电子金属（重费米子系统）

重电子金属：指某些二元或三元金属间化合物，其中一种成分是具有部分填充的 f 电子的稀土元素（Ce）或锕系元素（U，Np），另外的成分是不含 f 电子（一般含 d 电子）的金属或非金属元素，其化学式包含几个原子到几十个原子，巡游电子具有特大的有效质量（比真空中的自由电子的质量大两个量级）. f-f 原子的间距 a 大于 Hill 距离（0.34nm）是出现重电子行为的必要条件，这个条件的实现依靠非 f 电子（如 d 电子）. 非 f 电子的作用是：①确定材料的晶格结构；②增加 f 原子的间距，从而减小 f 原子间的直接相互作用；③通过 d 电子和 f 电子的相互作用，影响系统的性质.

重电子金属的特点：①从零温外推的线性比热系数 $\gamma(0)$ 和磁化率 $\chi(0)$ 比普通金属大（分别为 100 多倍和 10～100 倍）. ②传导电子的有效质量 m^* 特别大，$m^*/m > 100$. ③低温状态下，f 电子与巡游电子（d 电子）相互作用，导致电磁和热学性质反常以及传导电子的有效质量 m^* 增大；室温及以上，像普通传导电子和 f 电子磁性；④能带窄，反铁磁性与超导电性共存，与高温超导体有相似之处. 表 2-4 是重电子金属低温性质举例.

比热 C 与比热系数 $\gamma(0)$ 的计算公式如下：

$$C = \gamma T + \beta T^2, \qquad \gamma = \frac{m^* k_F k_B^2}{3\hbar^2} \to m^*.$$

① 1 bar = 100kPa.

表 2-4　重电子金属低温性质举例

类　型	材　料	a (nm)	m^*/m	$\gamma(0)$ (mJ/(mol·K^2))	$\chi(0)/4\pi$ (10^{-3}/mol)	T_c (K)
超导体	$CeCu_2Si_2$	0.41	460	1100	7	0.6
	UBe_{13}	0.513	300	1100	15	0.9
	UPt_3	0.41	178	450	7	0.5
反铁磁体	U_2Zn_{17}	0.439	> 100	535	12.5	9.7
	UCd_{11}	0.656	> 100	840	38	5.0
	$NpBe_{13}$	0.518	230	900	50	3.4

2.2.3　氧化物高温超导体

2.2.3.1　氧化物高温超导体的发现

氧化物高温超导体的发现年代见表 2-5 所列.

表 2-5　氧化物高温超导体的发现年代

超导体	T_c (K)	发现年代	发现者
$SrTiO_3$	0.4	1964	
$Li_{1+x}Ti_{2-x}O_4$	13	1974	
$BaPb_{3-x}Bi_xO_3$	23.2	1974	
LaBaCuO	35	1986	Bednorz & Mueller
YBaCuO	90	1987	朱经武、赵忠贤等
BiSrCaCuO	100 ~ 125	1988	
TlBaCaCuO	125	1992	

2.2.3.2　氧化物高温超导体的结构

氧化物高温超导体的结构已经定出，均属钙钛矿（层状陶瓷）结构的变形，易碎，有三类基本结构：La_2CuO_4（La214 结构）、$YBa_2Cu_3O_7$（Y123 结构）、$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_9$（Tl223 结构），分别见图 2-1，图 2-2 和图 2-3.

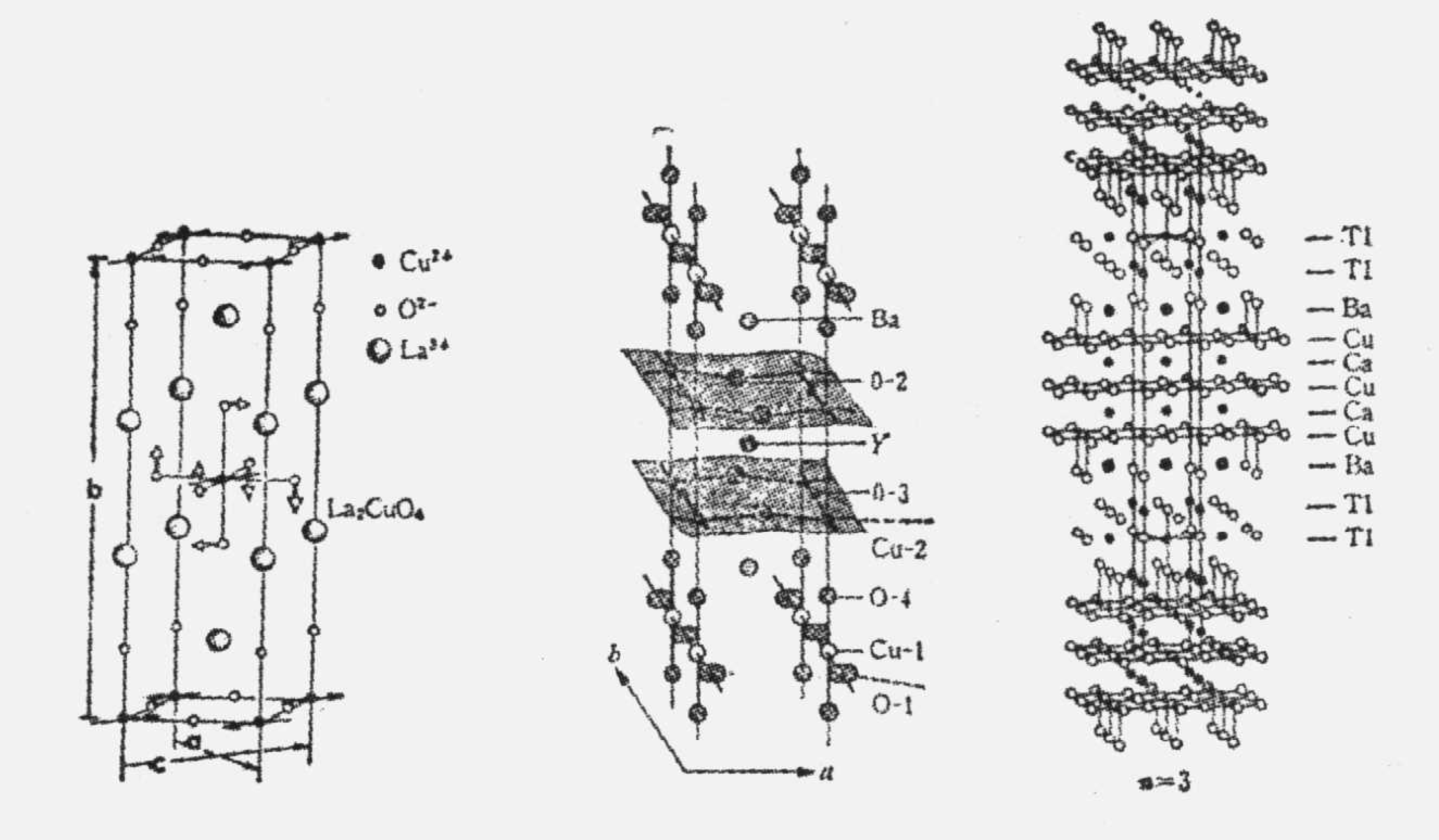


图 2-1　La214 相的晶体结构　图 2-2 Y123 相的晶体结构　图 2-3 Tl223 相的晶体结构

通过元素置换（掺杂）可获得一系列超导体，它们对杂质敏感（从绝缘变为导体，再变为超导体），都存在 Cu-O 层，在高温超导中起关键作用；其他原子层起储备载流子所需电荷的作用．导电的 Cu-O 层与储荷层之间的电荷转移是理解高温超导现象的关键，改变氧含量可控制上述电荷转移．

氧化物高温超导体的电子结构上的特点是 CuO_2 层的键合是离子键与金属键的混合．

2.2.3.3　氧化物高温超导体的特点

超导性：临界温度 T_c 高，载流子是 2e Cooper 对；强Ⅱ型超导体，电导各向异性（准二维层状结构，平面超导电性）；Cooper 对的关联长度小（Y123 为 0.7nm），且远远小于常规超导体 Cooper 对的关联长度（10nm ~ 1.0×10^3nm）；载流子浓度低，存在赝能隙，超导体内存在条纹结构．

正常态出现反常性质（与通常金属相比的反常）：电阻率与温度呈线性关系，不能用电子-声子散射解释；Hall 系数与温度的关系反常；费米面与费米液体理论不符；正常态为反铁磁相．

2.2.3.4　氧化物高温超导体形成的机制与理论

机制：2e Cooper 对如何形成？人们认为，不是电子-声子的作用．

理论：有关氧化物高温超导体的理论很多，目前还不统一，其中主要包括

以下两类:

(1) 弱耦合 (BCS 型) 理论: 高温超导现象可用费米液体理论描述，但要改进配对机制以提高 T_c.

(2) 强耦合 (非 BCS 型) 理论: 这种理论以 Mott 绝缘体和 Hubbard 哈密顿量为出发点.

2.2.3.5 非常规超导体的共性

非常规超导体包括氧化物超导体、有机超导体、重电子超导体以及 C_{60}等. 它们具有的共性是: T_c 高，具有准二维层状结构，载流子浓度低，相干长度短，等等.

2.2.4 C_{60} (C_{70})

固体碳的类型及其结构如表 2-6 所示.

表 2-6　固体碳的类型及其结构

固体碳的类型	有序类型	键　型	间距 (nm)	电　性
金刚石	立方	共价 (双)		绝缘体
石墨	平面六角	共价 (单、双)		导体
	层间	Van der Waals	0.335	
C_{60}	足球型 (C_{70}为椭球)		(六角)0.140	绝缘体
	(五角 + 六角)		(五角)0.145	
	C_{60}间最小距离		0.29	

C_{60}靠 Van der Waals 力结合成固体，掺杂碱金属成为导体或超导体 (掺杂碱金属饱和时成为绝缘体), 例如:

化合物	K_3C_{60}	Cs_2RbC_{60}	$Rb_{2.7}Tl_{2.2}C_{60}$
T_c (K)	18	33	45

低温 C_{60}呈现磁性，非线性光学系数高.

C_{60}, C_{70}的分子结构模型，以及碳纳米管的结构示意见图 2-4, 图 2-5, 图 2-6.

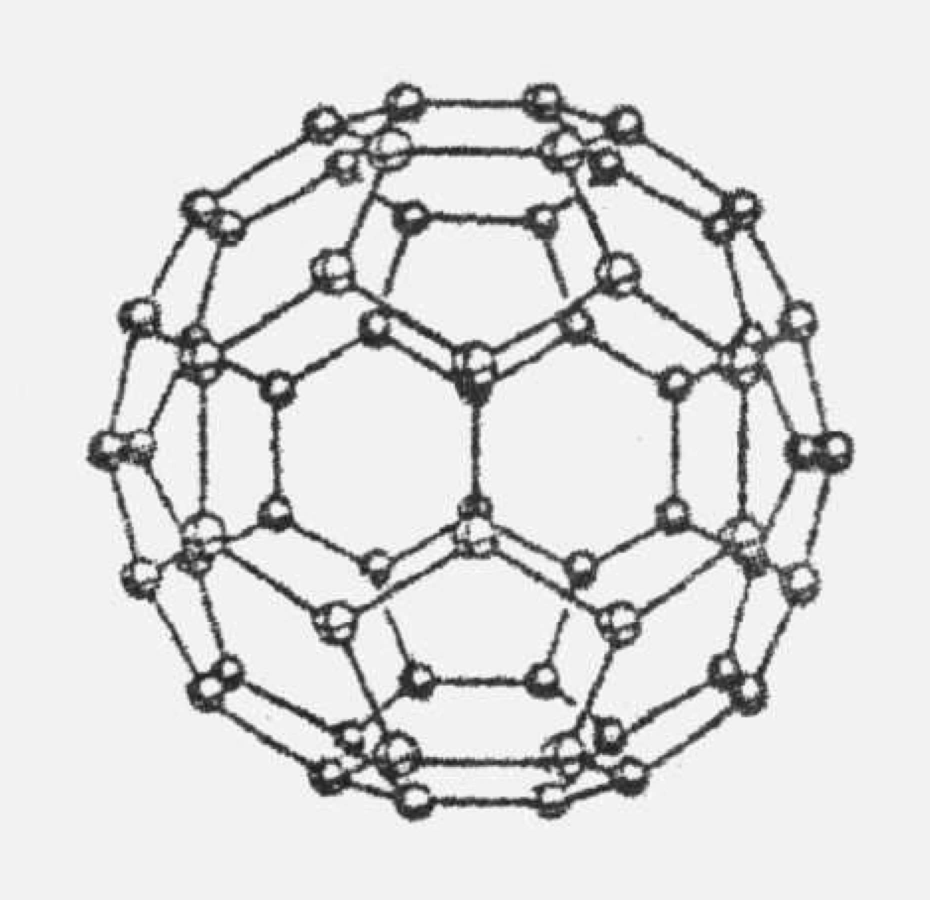


图 2-4　C_{60}分子结构模型

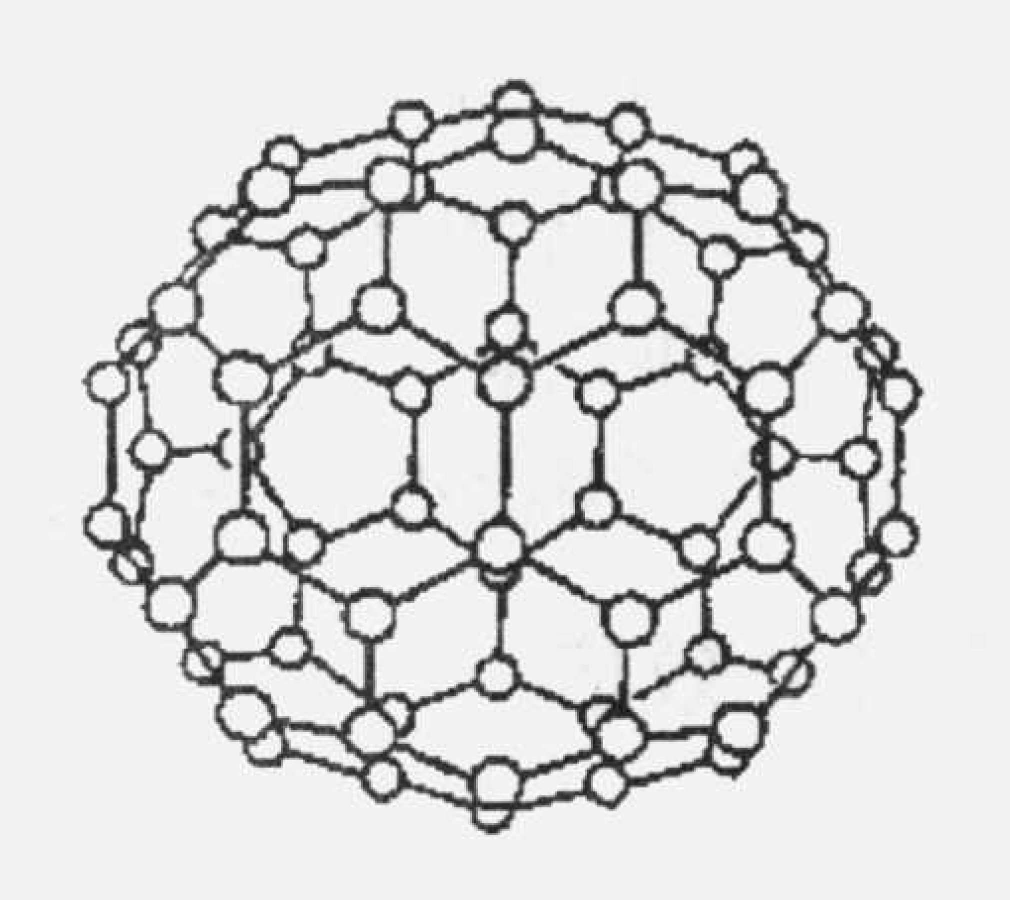
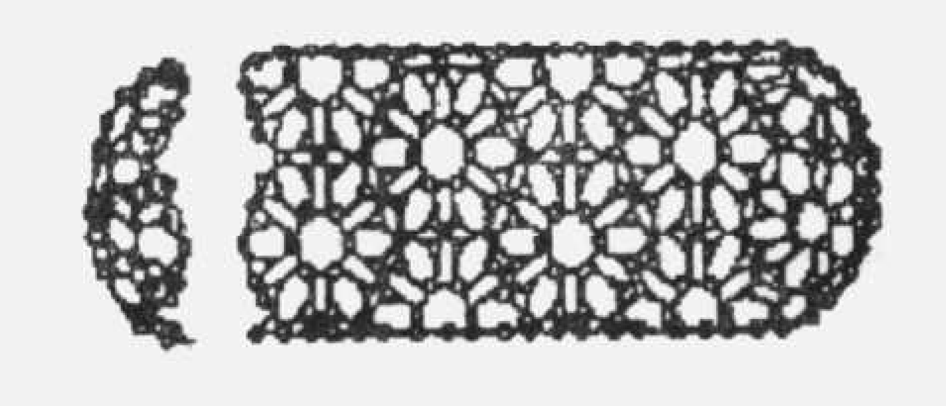


图 2-5　C_{70}分子结构模型



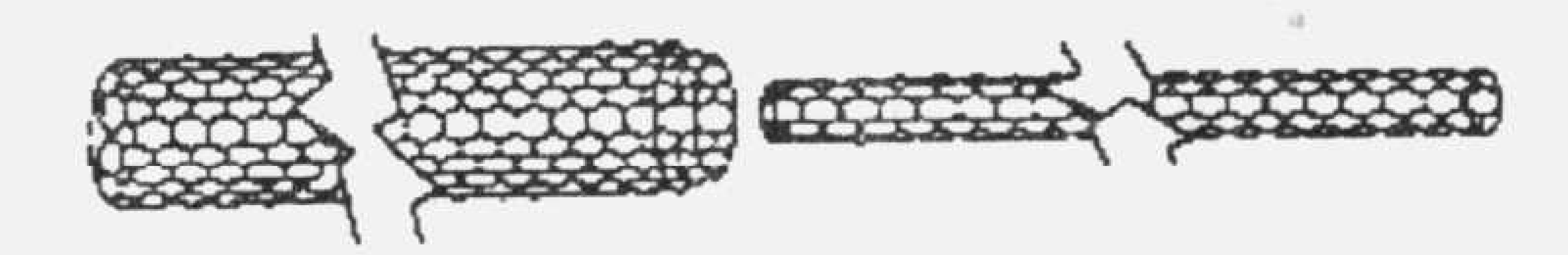


图 2-6　碳纳米管（布基管）的结构示意图

2.2.5　Wigner 晶体

在外场的约束下，电子按晶格方式排列成周期点阵系统，在二维强磁场的电子系统中发现了 Wigner 晶体.

2.2.6　金属多层膜（超晶格）

金属的磁有序层间耦合的多层膜，呈现出巨磁致电阻效应．例如 Fe/Cr/Fe 多层膜超晶格的反铁磁型耦合，以及 Fe/Cr 的巨磁致电阻效应使电阻随磁场的增大而大幅度减小.

耦合随非铁磁层厚度的增加而在铁磁和反铁磁之间交替振荡，周期性（$a = 1.0$nm）与晶体结构、元素 Z 无关；耦合强度与电子 nd 壳层和电子数有关．上述现象现用单轨道 Hubbard 模型描述.

2.3　低维系统与小系统：介观物理、团簇物理与纳米科技

低维系统包括：

(1) 层状分子排列的准二维系统，如表面、界面和膜；

(2) 长链分子或聚合物准一维系统，如量子线；

(3) 量子点与零维系统.

对低维系统，要考虑维度约束的量子效应和拓扑效应.

2.3.1 量子 Hall 效应

量子 Hall 效应已在低温（1K）强磁场（10T）的二维电子中实现 .

二维电子系统有三类：①束缚于液氦表面的电子气；②金属 - 氧化物 - 半导体场效应管氧化物与半导体之间的电子气；③两种半导体界面之间的电子气.

2.3.1.1 经典 Hall 效应（1879）

电阻、电流、磁场的关系如下：

$$\rho_H=\frac{E_Y}{j_x},\qquad j_x=nev,\qquad E_y=\frac{v}{c}B,$$

$$\rho_H=\frac{B}{nec},\qquad U_H=E_yL_y=\frac{vL_Y}{c}B.$$

经典 Hall 效应的特点是，ρ_H 正比于 B，霍尔电阻与磁场有线性、连续关系.

2.3.1.2 整数量子 Hall 效应（1980，Von Klitzing K.）

强磁场中二维电子气的量子运动与磁通量子化如下：

Landau 能级：$E_n=\left(n+\frac{1}{2}\right)\hbar\omega_c$；

单位面积状态数：$n_B=\frac{eB}{hc}$；

Landau 能级简并度：$N_B=n_B\sigma=\frac{\Phi}{hc/e}=\frac{\Phi}{\Phi_0}$；

1 个 Landau 能级填满时：$\rho_H=\frac{B}{n_Bec}=\frac{h}{e^2}$；

i 个 Landau 能级填满时：$\rho_H=\frac{B}{in_Bec}=\frac{h}{ie^2}$.

整数量子 Hall 效应来自：①电子气的量子运动与磁通量子化，故 i 取整数；②杂质造成 Landau 能级之间电子的定域态，平台是电子填充定域态造成

的；③量子 Hall 效应是普适的，与具体材料无关$\left(R_H=\frac{25812.8}{i}\Omega\right)$，可用于普适常数的精确测量.

2.3.1.3 分数量子 Hall 效应(1982，崔奇，H. L. Stormer，A. C. Gossard)

分数量子 Hall 效应需要更低的温度（0.1K）和更强的磁场（20T）. 当填充数 $\nu=\frac{1}{3}$，$\frac{2}{3}$，$\frac{2}{5}$，$\frac{3}{5}$，…时，出现 Hall 电阻 ρ_H 的平台，这是量子集体现象.

对量子 Hall 效应的解释目前有两种.

(1) R. Laughling 的解释：量子 Hall 效应是强关联电子系统的带分数电荷的集体激发，$\nu=m=\frac{p}{q}$（$p<q$）时激发的 Laughling 波函数为（液晶波函数）：

$$\psi_m(z_1, z_2, \cdots, z_n)=\prod_{j<k}^{n}(z_j-z_k)^m \exp\left(-\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}|z_i|^2\right),$$

$$z_k=x_k+\mathrm{i}y_k.$$

与 Landau 能级波函数比较可知，$m=\frac{1}{\nu}$.

(2) 统一解释：可从电子 - 电磁场量子系统的规范不变性得出.

2.3.2 准一维系统与有机链状分子

共轭聚合物：包括聚乙炔、聚二乙炔等具有碳链的线状分子. 通过化学掺杂，可使这些物质改变电阻率达十个数量级，从绝缘体经半导体、金属，达到超导体.

有机超导体：已有几十个，聚乙炔掺杂后电导率接近铜，超导临界温度 T_c 已达 12.8K. 其超导机制主要是电子 - 声子作用，电子 - 电子作用也比较重要.

2.3.3 零维体系与介观系统

零维体系与介观系统是三个维度的尺寸都很小的系统，包括：介观环、团簇以及量子点和量子阱.

2.3.3.1 介观系统

介观尺度：即保持量子相干性的尺度. 若温度为 1K，则介观尺度 L 为

10μm ~ 100μm. L 与电子的平均自由程（不发生碰撞的路程）相当.

（1）金属中的 AB（Aharonov - Bohm）效应.

①真空中的 AB 效应：1959 年，Aharonov 和 Bohm 预言（Phys. Rev. 1959, 115：485），磁通对真空中电子双缝干涉的条纹会产生周期性影响（周期为磁通量子：$\Phi_0 = \frac{ch}{e}$）. 1960 年，Chambers 用实验证实了这一预言（Phys. Rev. Lett. 1960，5：8）.

②金属中的 AB 效应（Phys. Rev. Lett. 1985，54：2696；1985，55：1610）：金属介观环（直径为 245nm，环宽为 30nm 的金环）的电导随环内磁通周期性振荡（周期为磁通量子：$\Phi_0 = \frac{ch}{e}$），介观环中的电流是持续的.

（2）AAS（Altshuler - Aharonov - Spivak）效应. 金属介观环的电导随环内磁通周期性振荡，其周期为$\frac{1}{2}$磁通量子（$\frac{ch}{2e}$），来自介观环中弹性散射体对电子的散射和逆散射态的叠加效应.

（3）普适电导涨落（UCF）（fingerprint，指纹）. 介观样品的电导存在着标志样品个性的可重复的涨落，这是由介观样品中无规则分布的散射体造成的.

（4）非定域性电导. 当电子的自由程接近或超过介观样品的尺度时，电子波函数的关联效应遍及整个样品，计算电导时，必须考虑样品结构之间和元件之间的相干与关联. 结构或元件分布的变化会引起电导的变化，这是量子波函数的非定域性造成的电导的非定域性.

（5）介观电路电导的 Landauer 理论（IBM J. Rev. Dev. 1957，1：223）. 这一理论把介观电路中的电导问题简化为电子对散射体势垒的穿透与散射问题，把电导率的计算归结为透射率和反射率的计算.

2.3.3.2 团簇（Cluster）

团簇是指由几个、几十个、几百个，乃至几千、几万个原子组成的亚纳米、纳米尺度（10^{-7}cm）的小体系，它是固体的“胚胎”. 团簇物理是原子物理、凝聚态物理、量子化学、表面物理、材料科学和核物理的交叉.

团簇产生的方法有离子溅射、激光蒸发、气体超声速膨胀，以及气体放电等.

团簇可分为以下三类：

金属团簇：由自由价电子键合.

半导体团簇：由取向共价键键合.

绝缘体团簇：其中卤化物团簇由离子键键合，惰性气体团簇由 Van der Waals 力键合.

位置序与动量（波）序是团簇的两种序．两种序的判别方法如下：

团簇中原子间距离为 $a\approx0.3$nm 时，相应的热运动动能为

$$E_k=\frac{h^2}{2ma^2}=\frac{3}{2}k_BT_0.$$

对应的温度为

$$T_0=\frac{h^2}{3ma^2k_B}.$$

当系统温度 $T>T_0$ 时，团簇为经典位置序；

当系统温度 $T<T_0$ 时，团簇为量子波序.

A 个原子的团簇 $T_0\approx60$K，在常温 $T>T_0$ 时，团簇是位置序；当 $T\ll T_0$ 时，团簇是波序.

对于电子，$T_0\approx10^4$K，一般 $T\ll T_0$，团簇中的电子是波序.

壳层结构（shell structure）与幻数（magic numbers）：

对于 Xe，当原子数 $A=13$，19，25，55，71，87，147 等幻数时，团簇丰度特别大（稳定）.

幻数的出现是电子在平均场中的量子运动形成壳层结构的结果，类似于原子化学性质的周期性.

惰性元素团簇指 Ne，Ar，Kr，Xe 的团簇，由 Van der Waals 力键合，是 Mackay 二十面体，幻数接近：

$$N=1+\sum_{p=1}^{n}(10p^2+2).$$

卤化物正负离子团簇指 CsI，CuBr，NaCl 的团簇，由库仑力和各种偶极力键合.

C_{60}团簇及其固体由 C，Si，Ge 等元素构成，以共价键键合.

激光蒸发发现，当碳原子数 $N=20$，24，28，32，36，50，60，70，…，240，540 等幻数时，生成的团簇最多，其中以 C_{60} 最稳定，称为富士团（fullerene－Buck－minster Fuller）．它是足球二十面体，可由石墨放电蒸发产生；而 C_{70}则像一个橄榄球.

金属团簇指 Li，Na，K，Cs，Cu，Ag，Au 等团簇．Li，Na，K 团簇的幻数为 $N=8$，18，20，34，58，92，….

可用壳模型解释幻数的出现. 幻数团簇结合能大，特别稳定，相邻粒子数的团簇的结合能 $E(N)$ 的二级差分可表示壳效应和团簇的稳定性：

$$\Delta_2(N)=E(N+1)-2E(N)+E(N-1).$$

产生团簇壳模结构的库仑平均势可选为 Woods - Saxon 型：

$$U(r)=\frac{U_0}{1+\exp[(r-a)/\varepsilon]}.$$

当两个以上的电子从团簇上剥离，正电荷分布的库仑排斥能超过团簇的束缚能时，产生团簇的库仑爆炸.

团簇的其他研究结果如下：

(1) 过渡金属团簇：复杂，幻数未弄清，但已获得氢化钴的幻数.

(2) Cu_N^+：^{63}Cu，^{65}Cu 有同位素效应.

(3) 铁磁过渡金属：Fe，Co 的低温磁性比固体值小.

(4) 超壳：对 Na，由平均场理论预言并被实验证实的幻数为：2，8，20，40，58，92，138，196，260，344，445，558（700，840，1040，1220，…，21000）.

(5) He 团簇：表现为液滴，^3He 的幻数为 2，8，20，40，….

团簇的点阵振动与电子激发对团簇的稳定性和光学性质很重要.

团簇是原子到固体的桥梁，它能够帮助了解电子能级结构的演化，如 Cu_{410} 3d 电子已具有大块铜的能带结构特征.

团簇的物理问题包括：①作为从原子到固体的桥梁，团簇演化的关节点是什么？②金属团簇壳结构的最大尺度. ③铁、镍、铌及一些复杂化合物的幻数. ④团簇的声光电磁性质.

团簇与超细纳米颗粒的比较：

团簇：几个至几百个原子，尺度小于 1nm;

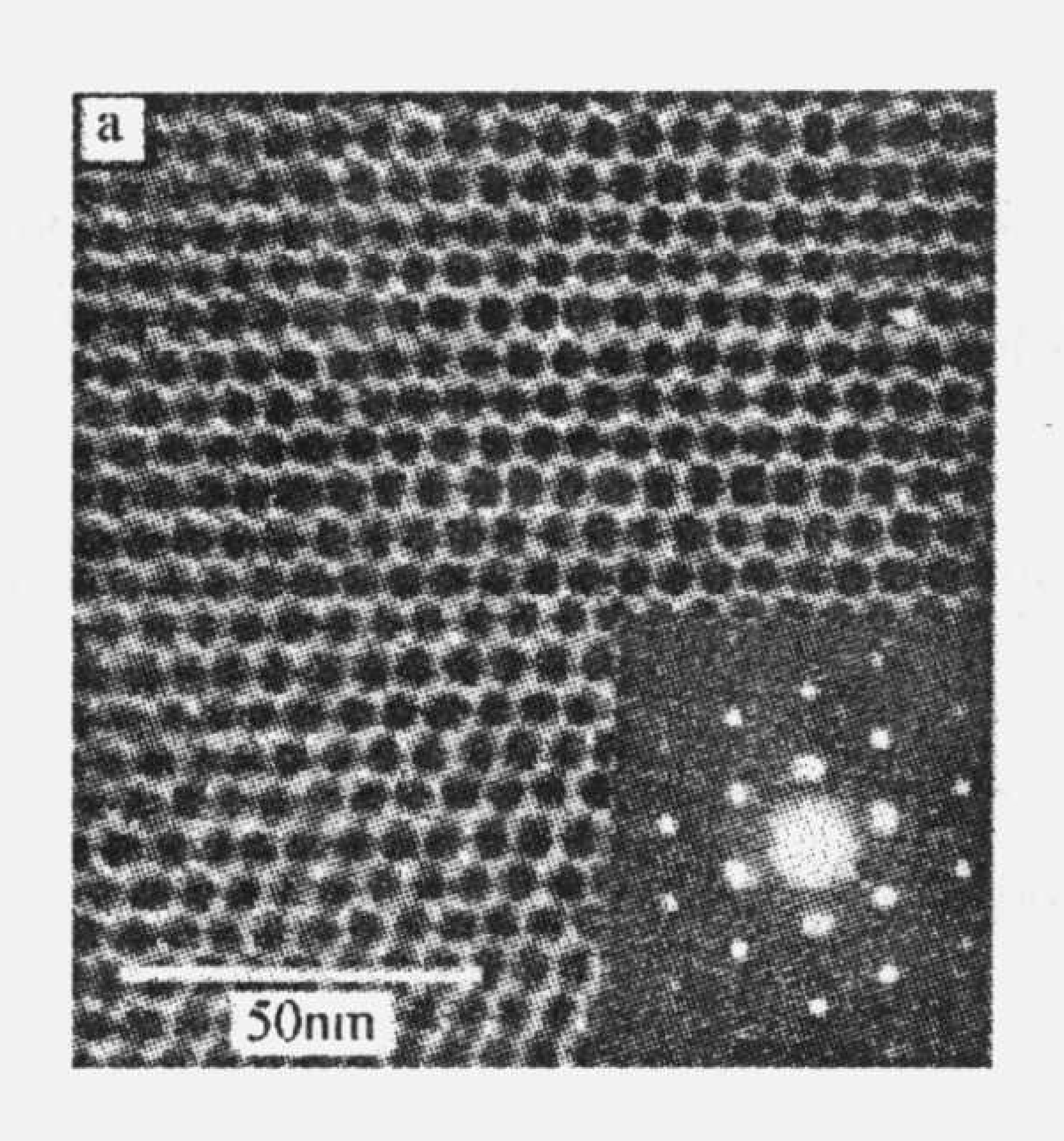
纳米颗粒：10^3 至 10^5 个原子，尺度为 1nm ~ 100nm.

2.3.3.3 量子点（阱）

(1) 准一维导体中的量子点：纳米或亚纳米尺度，电子能级分离，电导产生 Kondo 效应.

(2) 介观环中的量子点：电导的磁通效应和 Kondo 效应有重要的应用前景.

胶态晶体法组装得到的 Cd - Se 量子点超晶格的电镜图如图 2 - 7 所示.



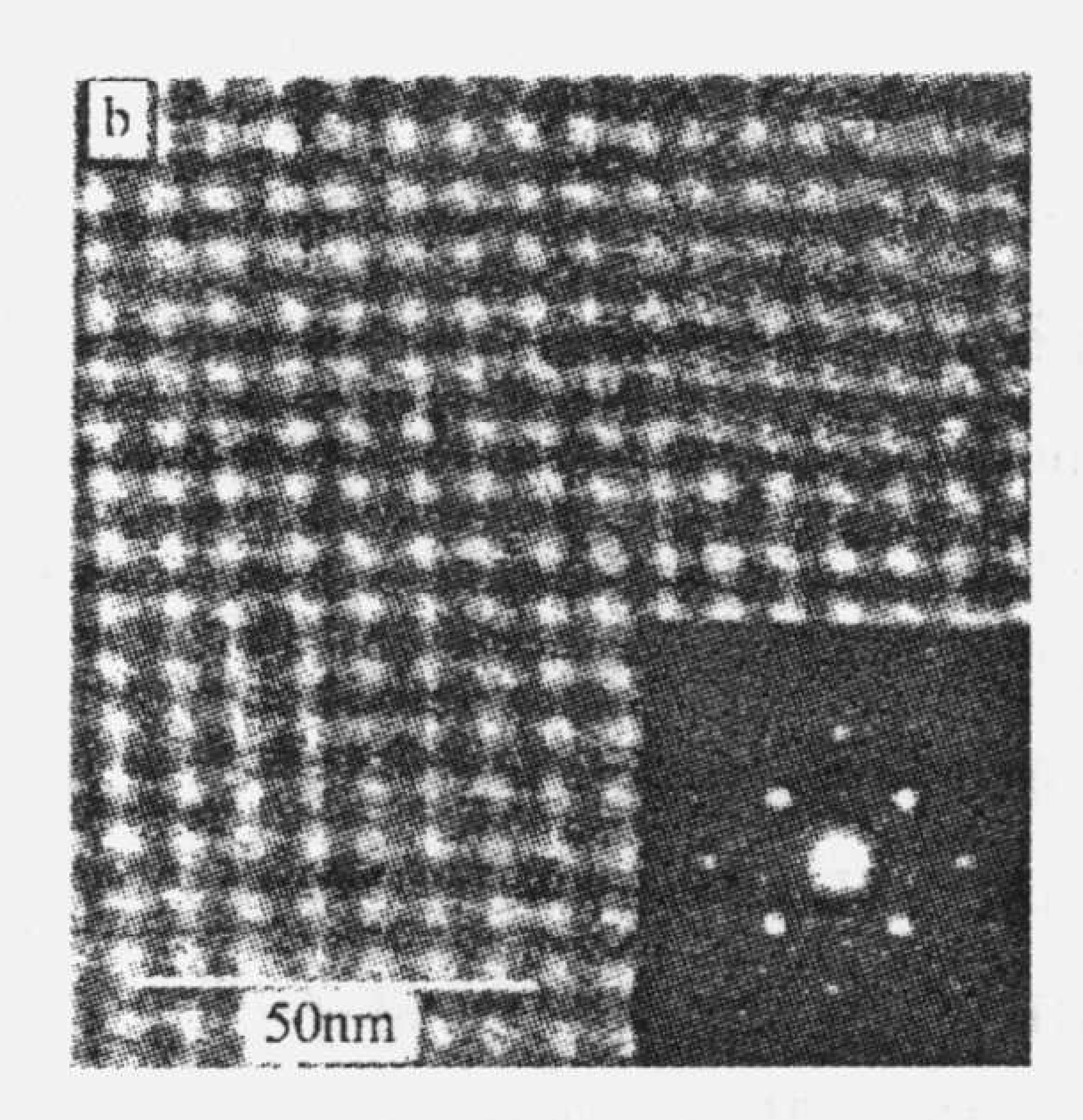


图 2-7　胶态晶体法组装得到的 Cd-Se 量子点超晶格的高分辨电镜照片（图中量子点尺寸为 4.8nm）

(a) fcc 排布的（101）面的图像及特征电子衍射图

(b) fcc 排布的（100）面的图像及特征电子衍射图

2.3.3.4　离（原）子阱与玻色-爱因斯坦凝聚（BEC）

离子阱包括：

(1) Paul 阱(trap)：指两组具有交变电场的电极形成的离子阱，可囚禁单个离子、电子很长时间，其囚禁势为(柱坐标)：$V(\vec{r},\ t)=\frac{1}{2}(\omega_\rho^2\rho^2+\omega_z^2z^2)$.

(2) 磁光阱（magnet-optic trap)：指两组线圈形成的非均匀磁场产生竖向磁约束（作用于原子磁矩），四束水平激光形成平面电场约束（作用于原子偶极矩）.

(3) 电子束离子阱：指强磁场中电子束的高速螺旋运动，既可以把原子剥离成离子，又可以把形成的离子约束在阱内．电子束离子阱可产生约束的高电荷态离子用于研究．

玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)在 1995 年实现,元素为 Rb,Na,Li 等原子①.

极低温度下，玻色统计造成的大量玻色型原子填充同一量子态，形成宏观量子现象，这是量子统计造成的而非相互作用造成的凝聚体（尺度为 μm).

产生 BEC 的条件为：$n_0\lambda^3\geqslant 2.612$，$(\frac{2\pi\hbar^2}{Mk_BT})^{1/2}$，$T\approx n$K.

产生 BEC 的过程如下：

---

① C. E. Wieman, E. A. Cornell, W. Ketterle. Science. 1995, 198: 269; Phys. Rev. Lett. 1995, 3969: 75, 1687.

（1）囚禁（trapping）：采用磁光阱.

（2）冷却（cooling）：①激光冷却，即利用原子光吸收的多普勒效应和自发辐射的各向同性冷却．②蒸发冷却，即利用热原子高速成分逃离位阱冷却．③Sympathetic Cooling，利用冷库原子冷却.

（3）凝聚（condensation）：当 $T \approx n\mathrm{K}$ 时，90%以上的原子填充最低能态，形成宏观量子态（波序）.

BEC 激发（excitation）有声子、涡旋、孤子、壁畴等模式.

BEC 可应用于原子光学（刻）、精密测量（谱学精度：5×10^{-12}，时间精度：2×10^{-15}）、原子激光、量子信息等.

BEC 形成过程的二维吸收像如图 2－8 所示．BEC 激光吸收像见图 2－9．BEC 实验装置见图 2－10.

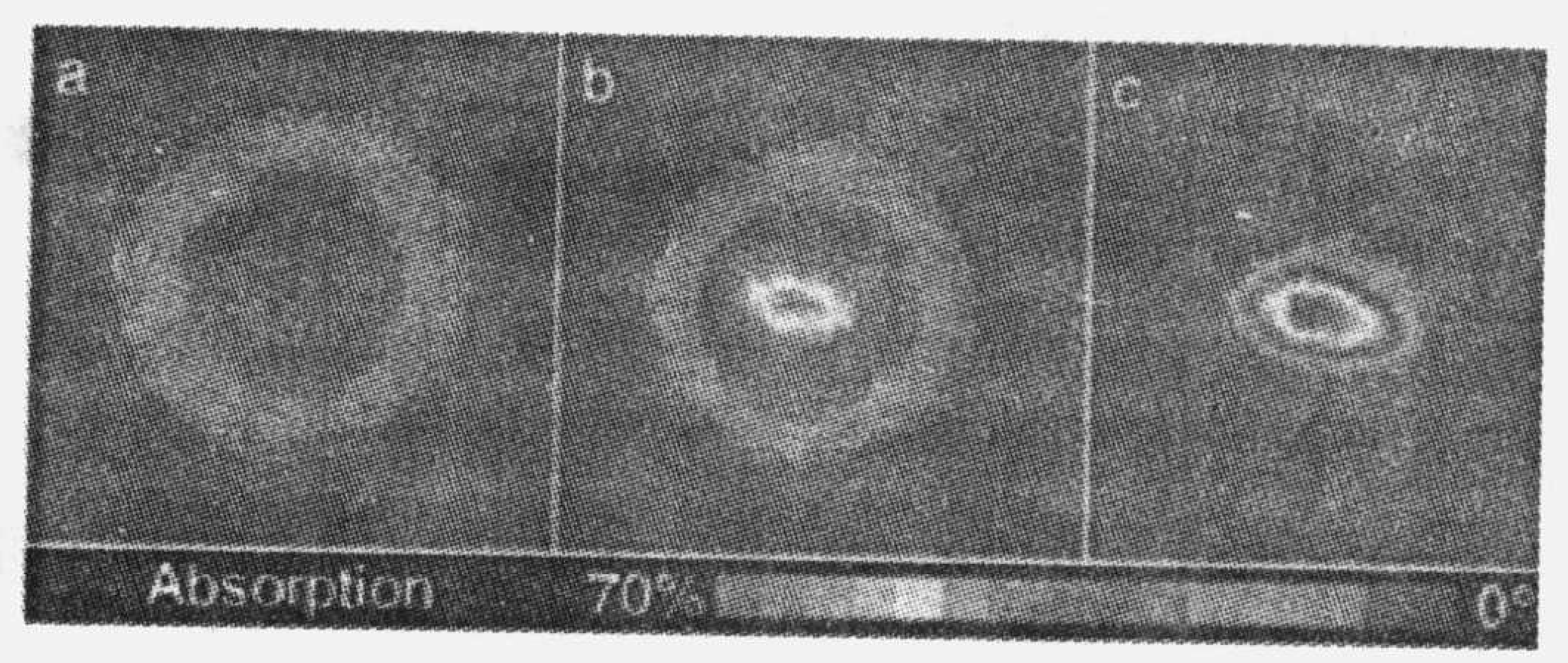
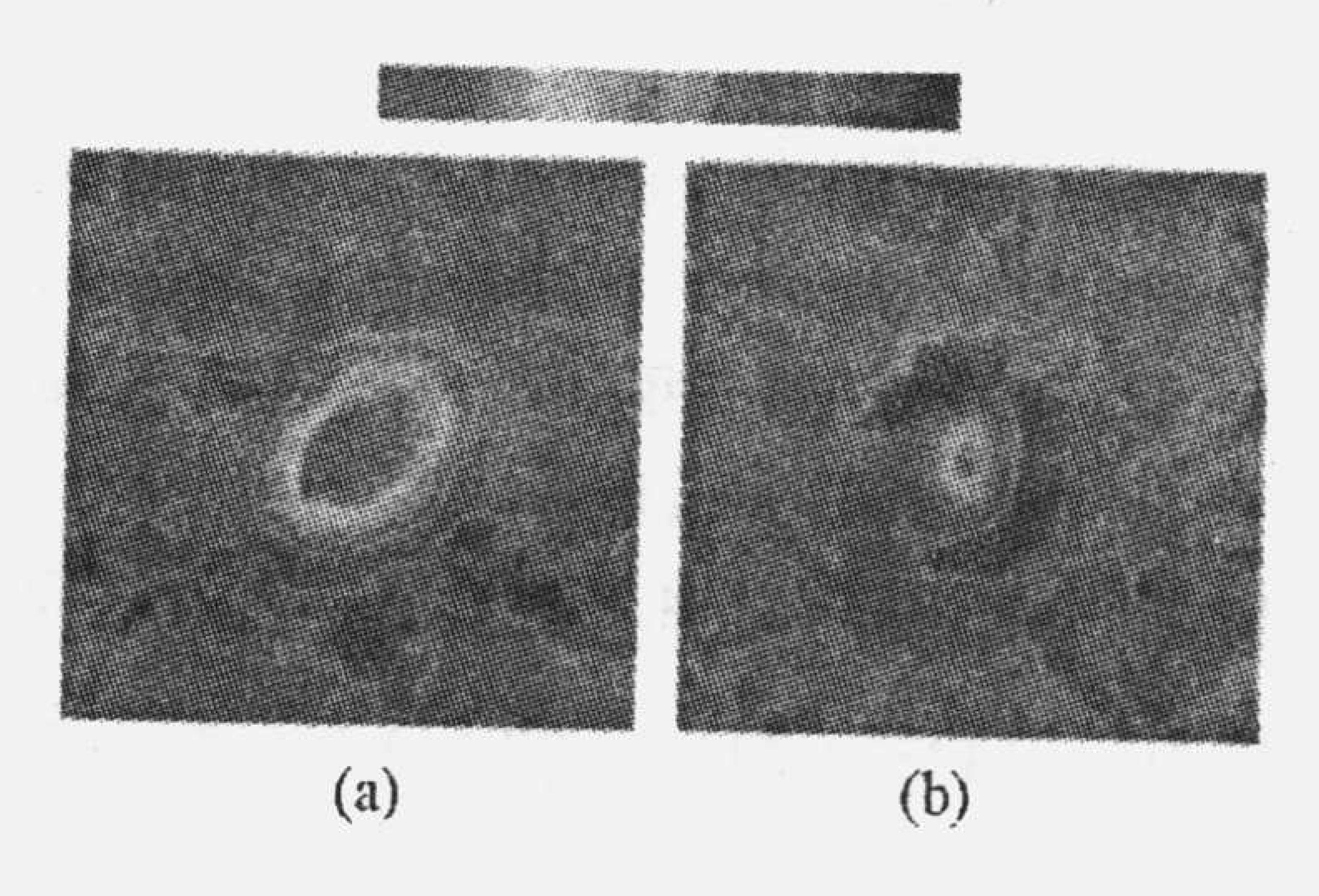


图 2－8　BEC 形成过程的二维吸收像（宽度为 970μm）

（a）转变温度之上的速度分布（b）刚出现凝聚（c）几乎全凝聚



(a)　　(b)

图 2－9　用 CCD 相机拍摄的 BEC 激光吸收像（边长尺寸为 570μm）

（a）590nK，1.2×10^5 个原子（b）100nK，2×10^4 个原子

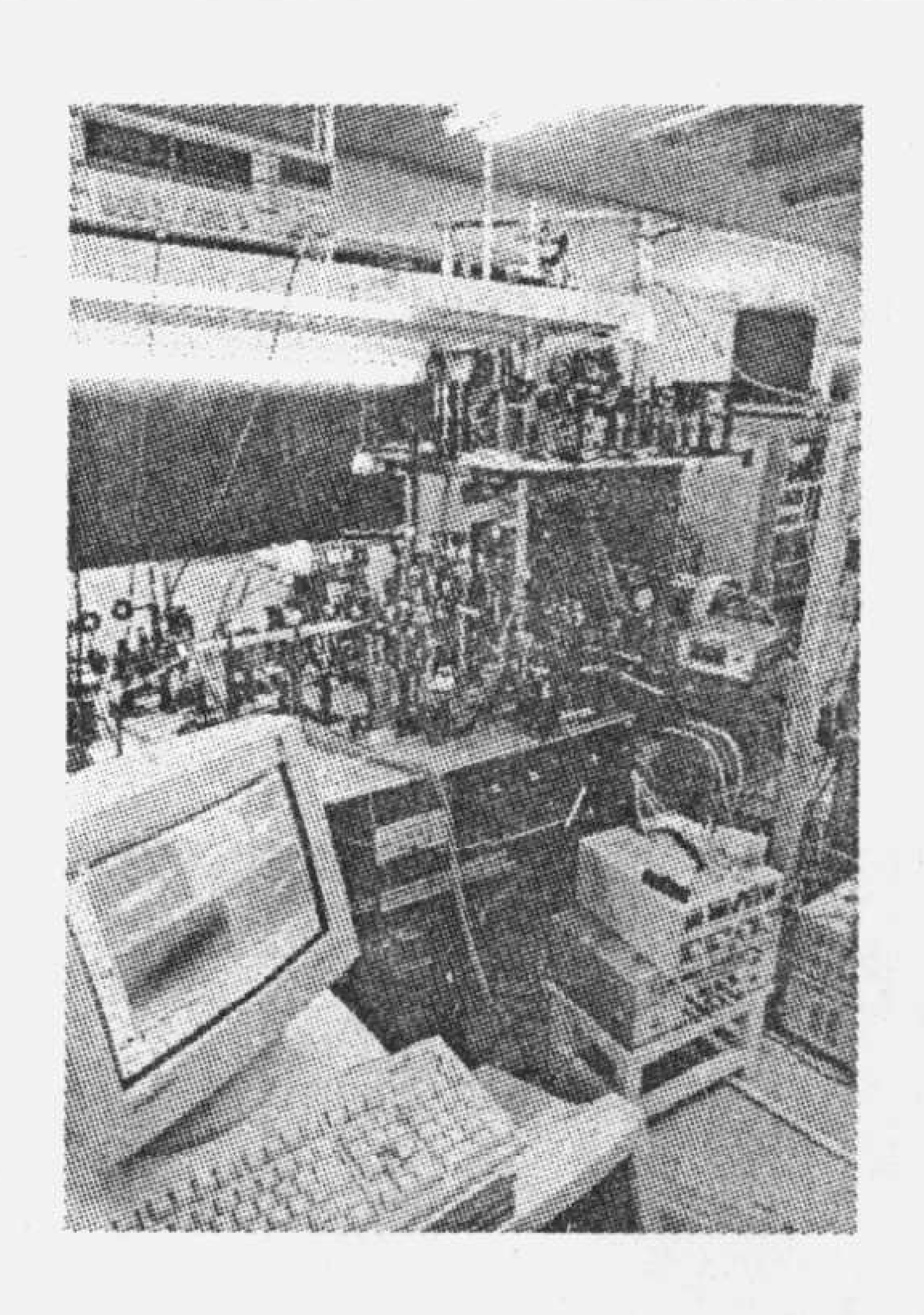


图 2-10　玻色-爱因斯坦凝聚（BEC）实验装置

2.3.4　纳米颗粒与纳米科技

纳米科技是世界高科技，它涉及物理、化学、生物、医学、材料、机电、计算机、信息等多个学科.

纳米维度包括：一维纳米，是准二维系统；二维纳米，是准一维系统；三维纳米，是准零维系统，即纳米颗粒.

纳米颗粒的特点：

（1）包含 $10^3 \sim 10^5$ 个原子，尺度为 1nm ~ 100nm.

（2）表面积与体积比特大，表面原子数与总原子数比大：

$$x = \frac{n \cdot 2r_0 \cdot \pi r^2}{n \cdot 4\pi r^3/3} = 1.5\frac{r_0}{r} > 1.5 \times \frac{10^{-8}}{k \times 10^{-7}} = \frac{15}{k}\% .$$

（3）表面活性大.

（4）电子能带能级分离.

（5）力学、电磁、光学性质不同于固体.

纳米颗粒的用途：

（1）利用表面化学活性制造纳米催化剂.

（2）利用力学性质制造纳米高强度材料.

（3）利用电磁性质制造纳米电磁器件（计算机芯片）.

（4）利用光学性质制造纳米光学器件.

(5) 纳米机电系统（NEMS）制成集传感器、控制器和执行器于一体，用于操纵与组装原子，实施医学手术的纳米机器人.

(6) 在生物、医学上用于对细胞、蛋白质、DNA 的微观研究,以及对生物大分子结构和功能的研究、裁剪与嫁接;在基因工程上,用于纳米药物的研制等.

纳米科技包括：纳米物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米加工学、纳米力学、纳米电子学、纳米生物武器. 纳米科技的主要研究和加工手段是扫描隧道显微镜（用 STM 占工作量的 50%以上）.

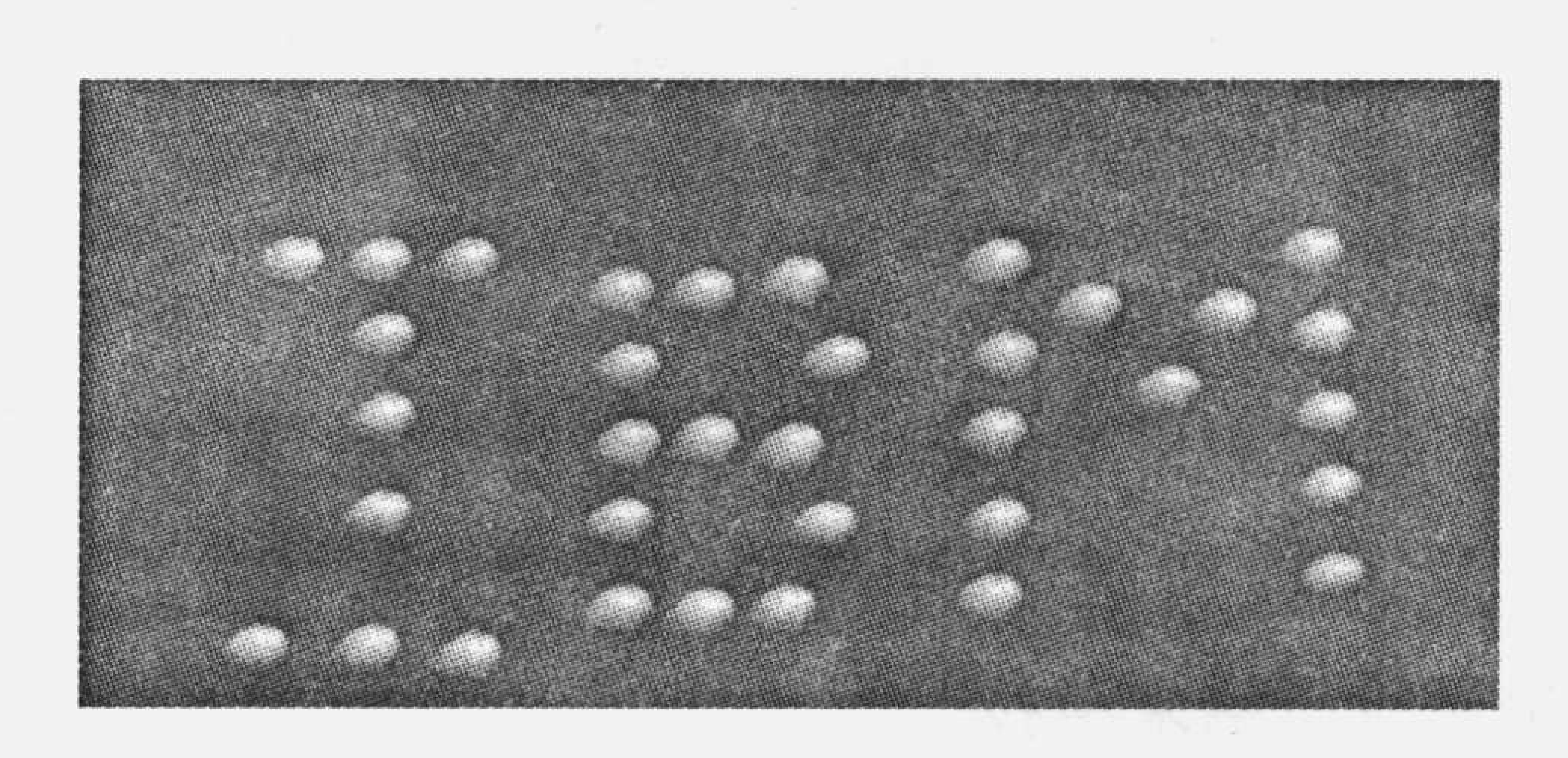


图 2－11　移动 35 个氙原子排成“IBM”字样

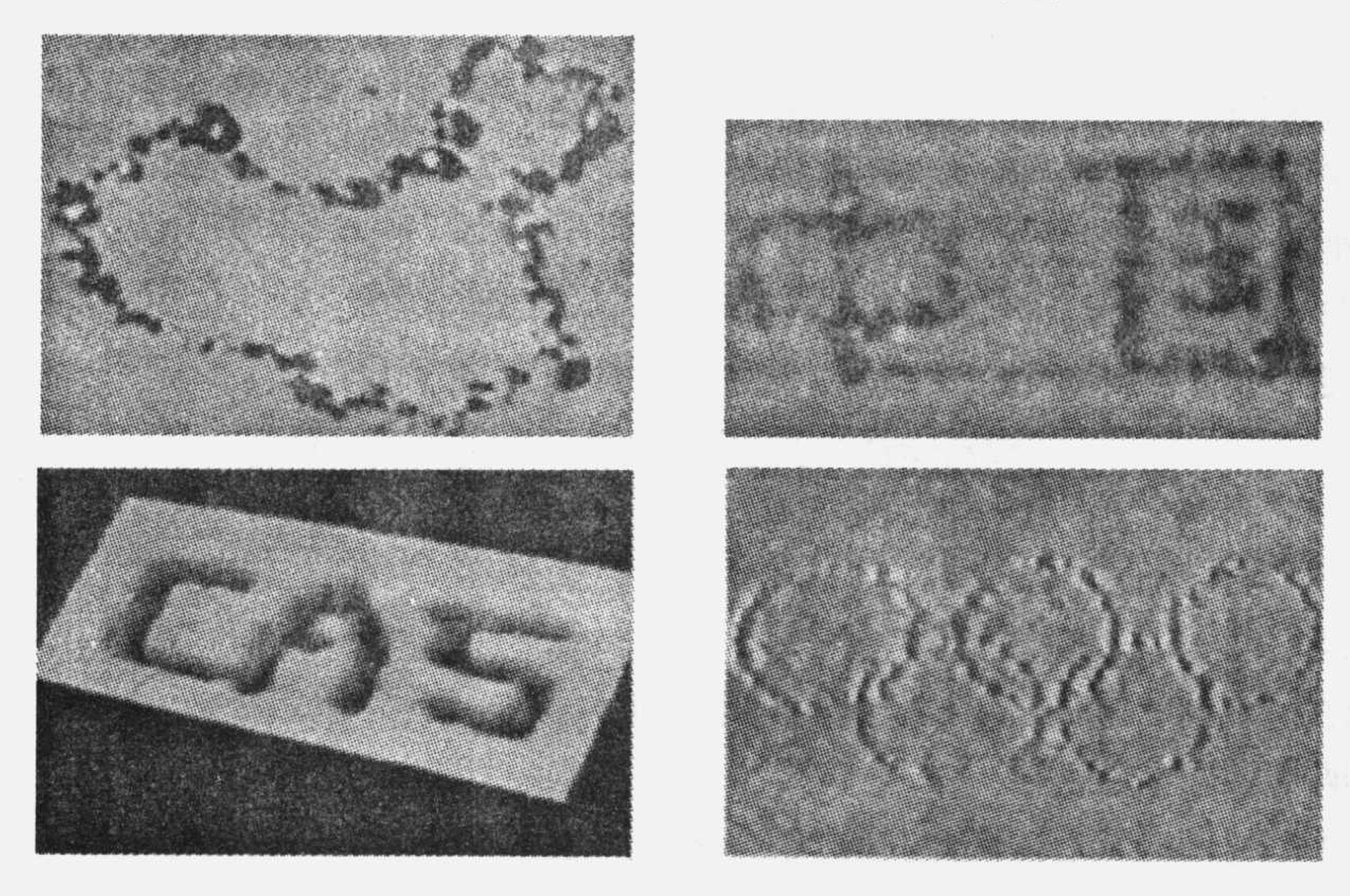


图 2－12　中国科学院化学研究所科研人员利用自制的扫描隧道显微镜在石墨表面上刻蚀出来的图像（这些图形的线宽只有 10nm）

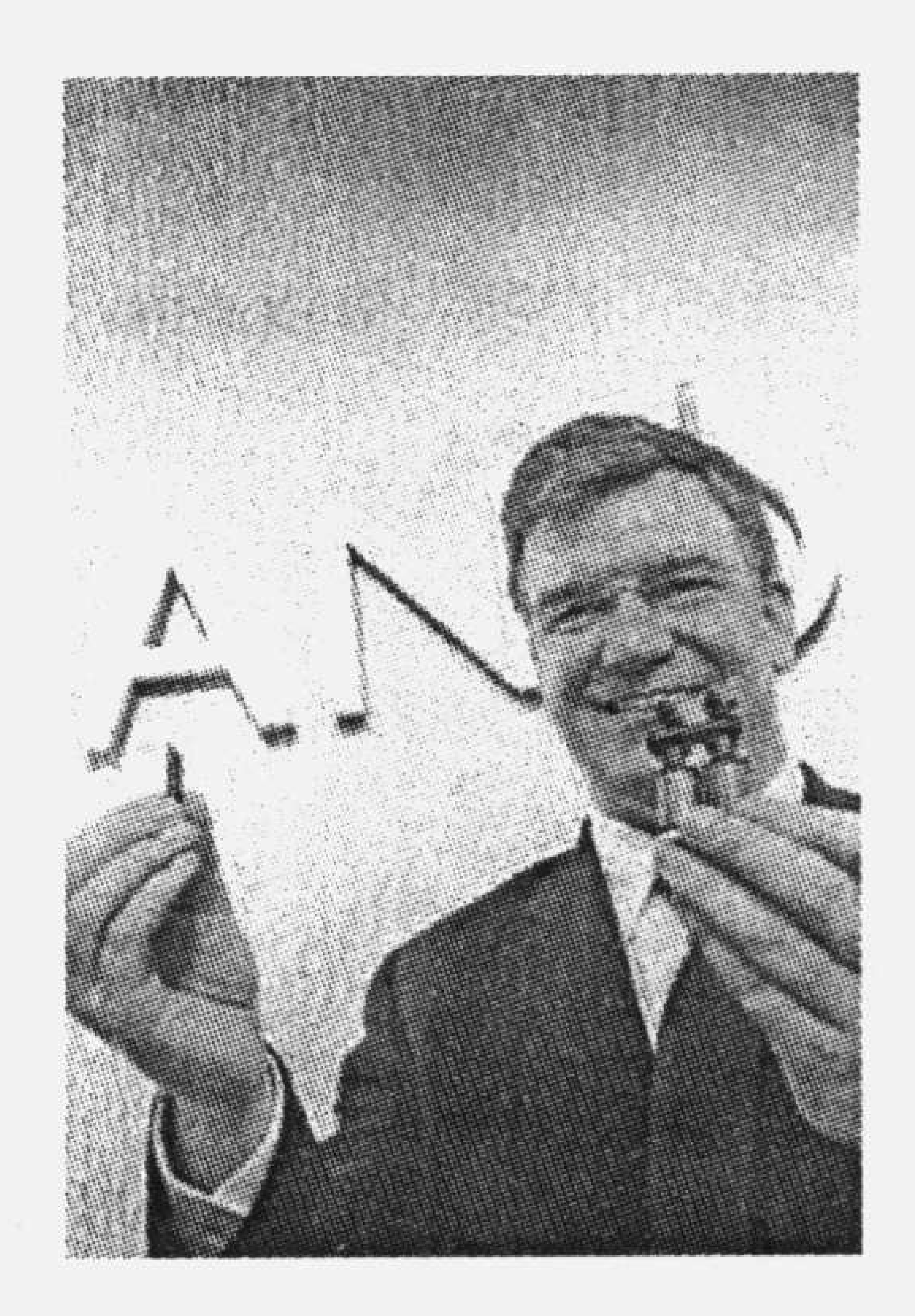


图 2 - 13　世界上最安静的马达（采用纳米技术制造，左）与传统马达作对比

纳米科技的重要进展有（见图 2 - 11 至图 2 - 13）：

（1）IBM 公司用 STM 使原子在镍基板上排列出 IBM 字样；

（2）德国、美国制成具有韧性的陶瓷氟化钙和二氧化钛；

（3）利用纳米生物技术，人类已能在纳米尺度上识别生物大分子，并进行裁剪与嫁接；

（4）纳米机械和纳米机器人的研制取得进展（已制成纳米马达）.

2.4　等离子体物理学与核聚变

等离子体物理学与核聚变同能源、空间技术以及国防技术密切相关.

2.4.1　等离子体物理的基本问题

等离子体：指大量原子电离后，由离子和电子组成的中性气体.

等离子体的特点：具有很强的电磁相互作用，很强的电子 - 电子、电子 - 离子、离子 - 离子相互作用，电子、离子与电磁波强耦合，同时具有复杂的集体激发模式.

等离子体物理的基本问题包括：

（1）各种离子的平衡态性质.

(2) 各种等离子体波和非线性集体激发的不稳定性.

(3) 等离子体电磁辐射.

(4) 非平衡弛豫过程，物质、电荷、能量的输运等.

2.4.2 等离子体物理新的研究领域

等离子体物理新的研究领域包括：非中性等离子体物理、强耦合等离子体物理、非线性等离子体物理（湍流）、激光等离子体物理、高能等离子体物理、聚变等离子体物理.

2.4.3 聚变等离子体物理

聚变等离子体物理研究以下问题：

(1) 磁约束聚变等离子体物理：托卡马克装置已接近劳逊条件.

(2) 惯性约束聚变等离子体物理.

(3) 重点与前沿课题：①激光与等离子体的相互作用；②内爆动力学，即电子、离子的运动与输运性质.

2.4.4 空间和天体等离子体物理

空间和天体等离子体物理主要研究：

(1) 空间等离子体物理，即地球高层空间和日地空间等离子体物理.

(2) 天体等离子体物理，即太阳、恒星、星际等离子体物理.

2.4.5 低温等离子体物理与技术

低温等离子体是指温度在几十万度以下的等离子体. 这种等离子体有以下三类：

(1) 热等离子体：由强直流电弧放电或高频（几兆至几十兆赫兹）感应耦合放电产生.

(2) 冷等离子体：由辉光放电、微波放电、电晕放电产生.

(3) 燃烧等离子体：火焰燃烧产生的等离子体.

低温等离子体的应用：

(1) 表面处理：刻蚀、淀积、改性、溅射.

(2) 等离子体相化工生产：合成、产生超细超纯粉末.

(3) 热处理与热加工：喷涂、冶金、球化、焊接、切割、烧结.

(4) 等离子体光源：高、低气压照明灯，气体放电激光器，等离子体显示器.

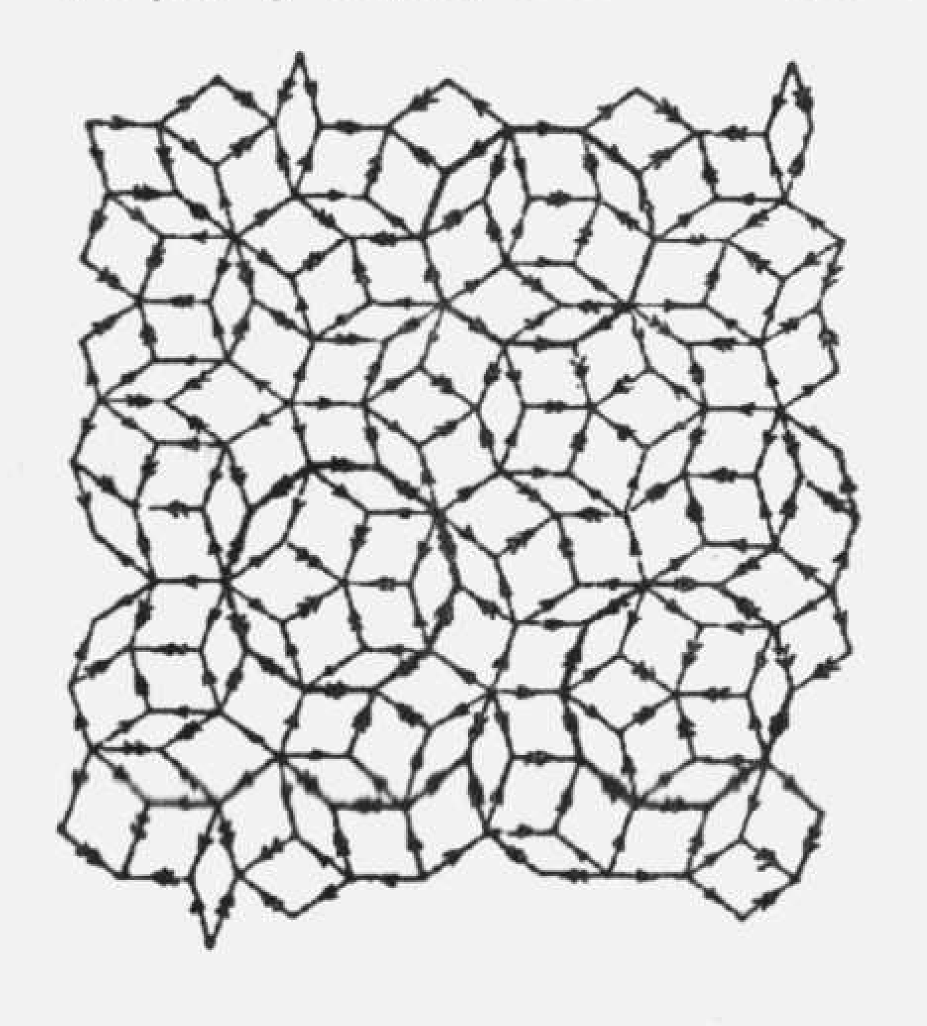
(5) 磁流体发电.

2.5　人造系统：超晶格、准晶格与人造原子

2.5.1　超晶格

用固体微加工技术（如分子外延技术）把异质或不同组分的材料交替地结合成固体，形成的具有两种以上倒格矢的周期结构的晶体称为超晶格. 人们以此获得新的力学、声学、电磁学和光学性质.

图 2－14 为平面的 Penrose 拼砌.



2－14　平面的 Penrose 拼砌

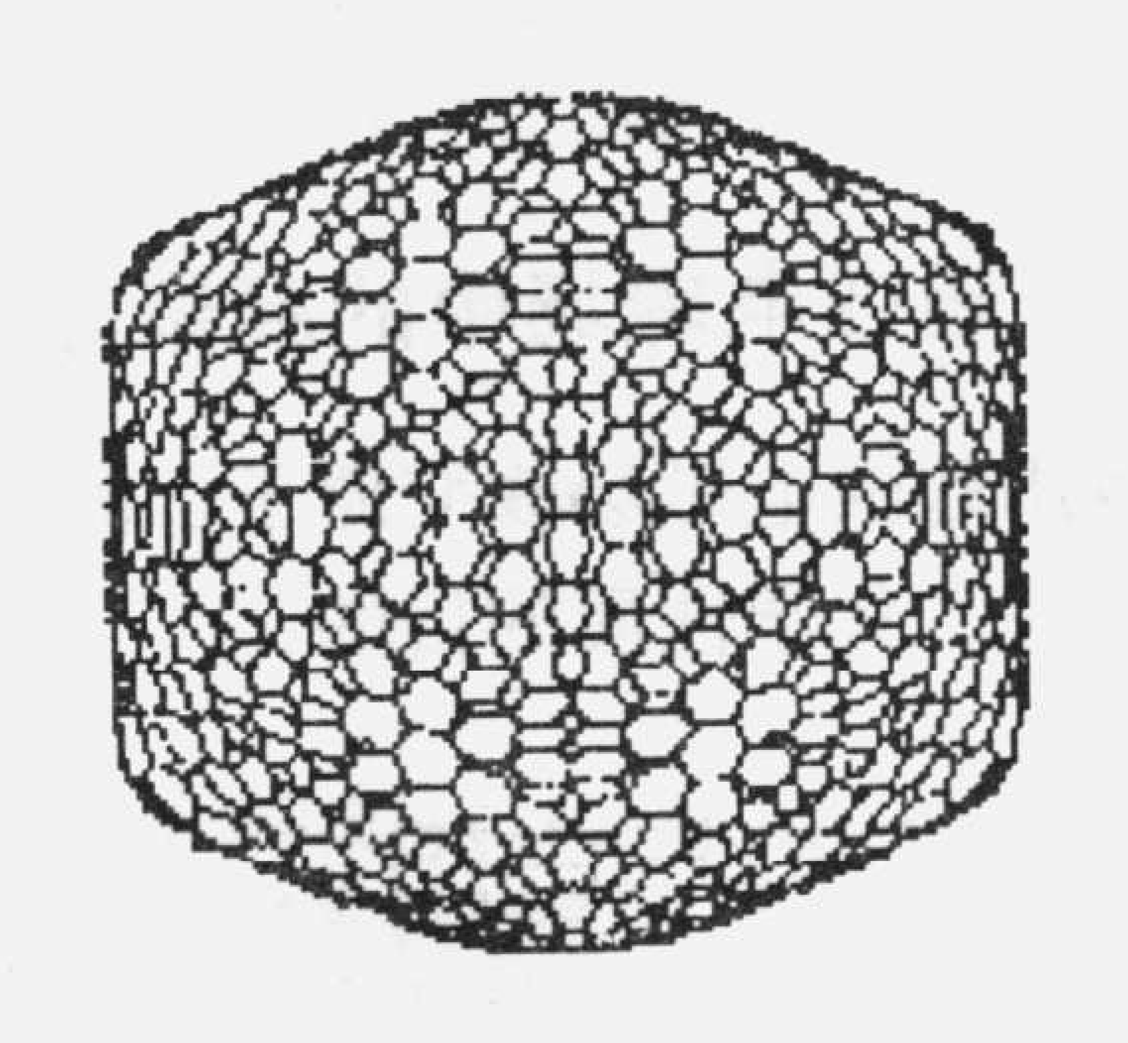


图 2－15　布基洋葱的结构示意图

2.5.2　准晶格

准晶格是指没有严格的周期结构（或有很多倒格矢）的晶体，如图 2－15 所示.

2.5.3　人造原子

人造原子是指在固体中造出纳米或亚纳米尺度的量子阱和量子势，电子被束缚形成能级和量子态，从而像原子一样具有光吸收与发射等性质.

2.5.4　固体或液体环境中的原子和分子

固体或液体中的离子和电子环境形成的平均场，通过介电常数和电子有效

质量影响其中的杂质原子、分子、离子的外层电子运动，改变其能级、量子态和相应的光谱特征．晶体的对称性也会影响电子能级（如使能级分裂）．

2.6 极端条件下的凝聚态物理学

2.6.1 高温高压下的凝聚态

高温高压下凝聚态的研究对象包括高速碰撞下的物性，地心铁的凝聚态的物性和天体中的凝聚态（如木星中压强为100Mbar，40%的氢）的物性．高温高压下，晶格常数缩短，原子（离子）的电子壳受到强烈的冲撞和挤压，晶格运动和电子运动受到很大的扰动，其物理和化学性质也要发生变化．

高温高压下凝聚态物理学研究的任务是测量和研究高温高压凝聚态的物理性质，提取相变和物态方程的信息．

2.6.2 超强电磁场中的凝聚态

运用超强电磁场改变原子、离子、电子的量子运动状态，可达到改变凝聚态的物理、化学性质的目的．

2.7 复杂性与自组织

2.7.1 复杂性

2.7.1.1 什么是复杂性

多体（多粒子或多组元）系统由于相互作用产生不同层次的关联和不同层次的在时间和空间上的结构，以及与此相应的不同的性质和功能，形成系统的结构、性质与功能的复杂性．复杂性与系统的结构、性质与功能的层次性密切相关．

简单性与复杂性的关系：简单的基本定律在一定条件下的多次应用就会产生不同层次的结构、性质和功能的复杂性（见图 2-16 至图 2-19）．

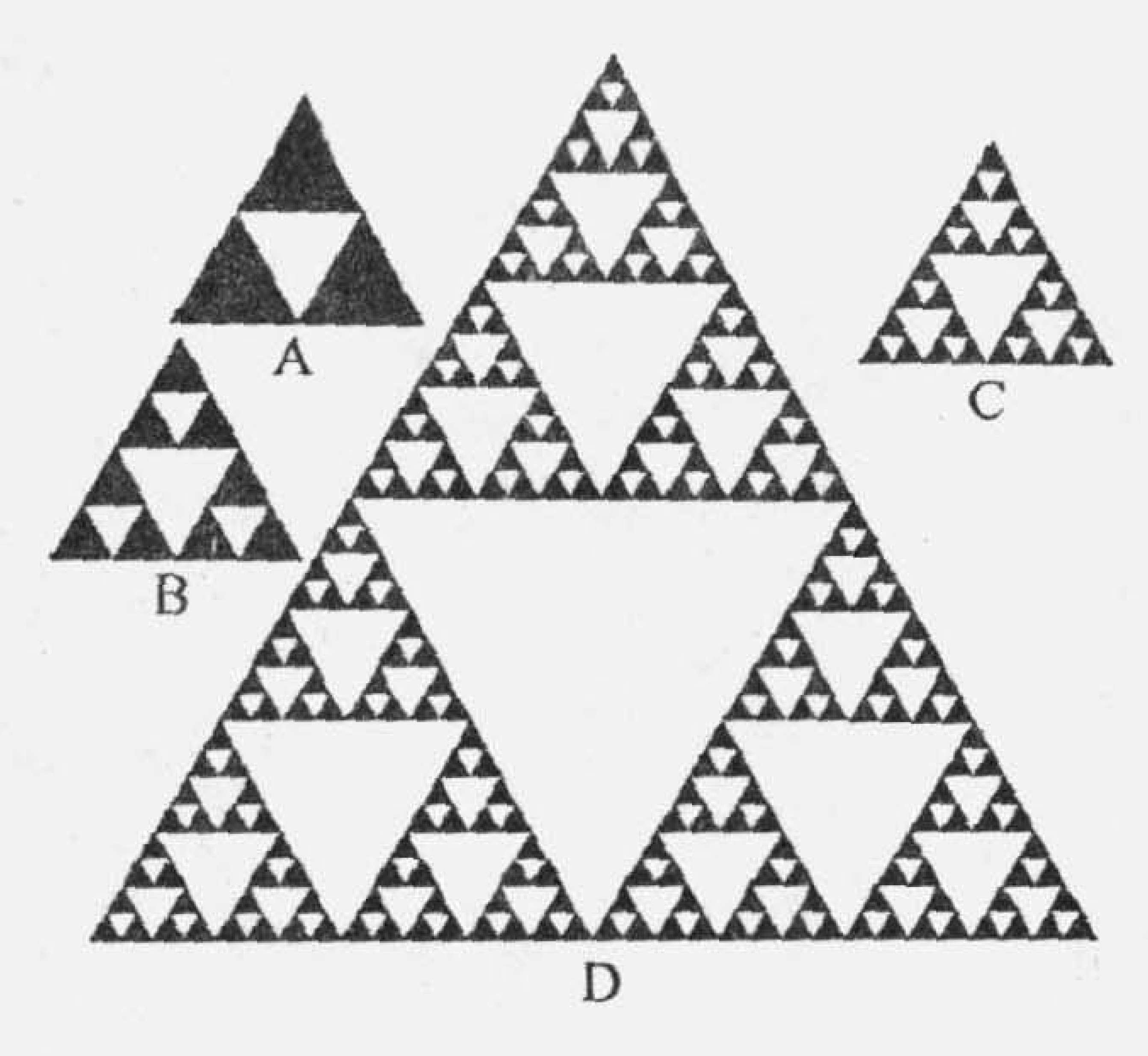


图 2-16　谢尔宾斯基三角形生成过程（只示意了前四步）

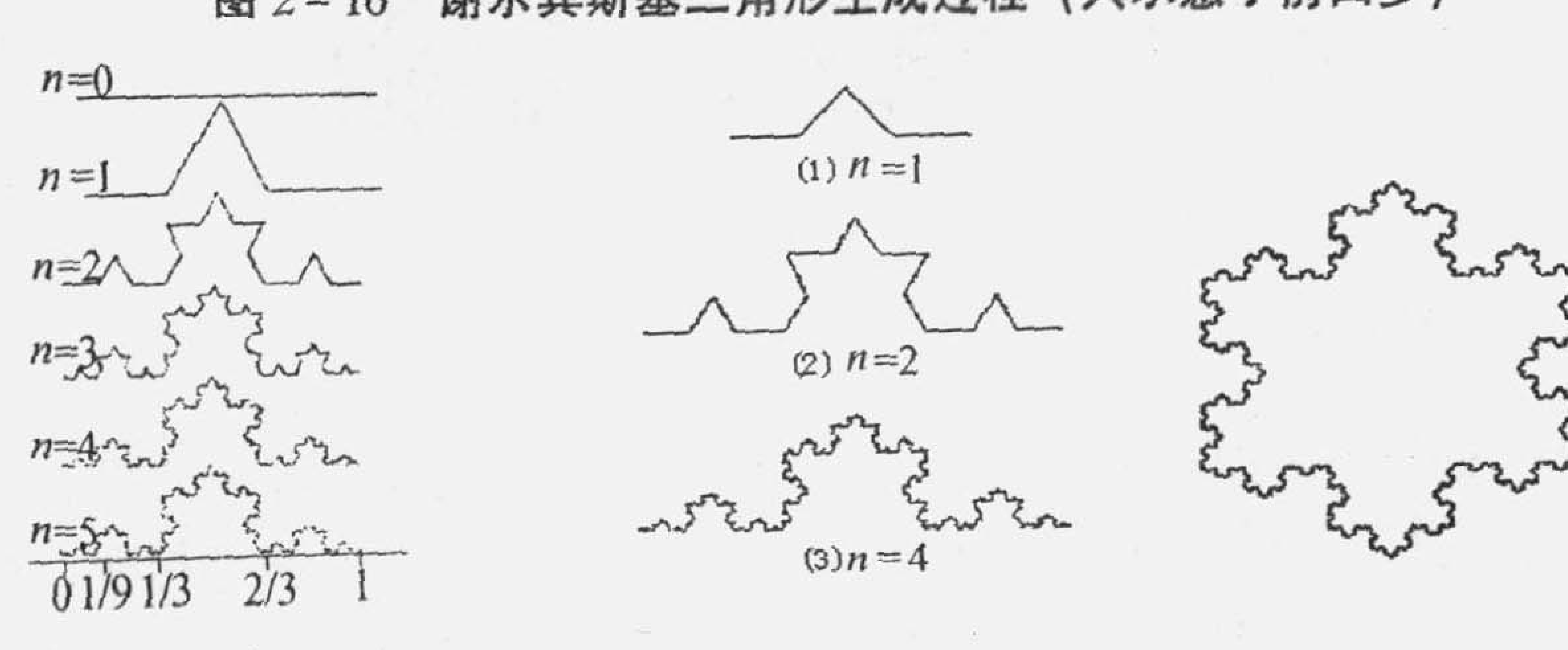


图 2-17　Von Koch 曲线的构造

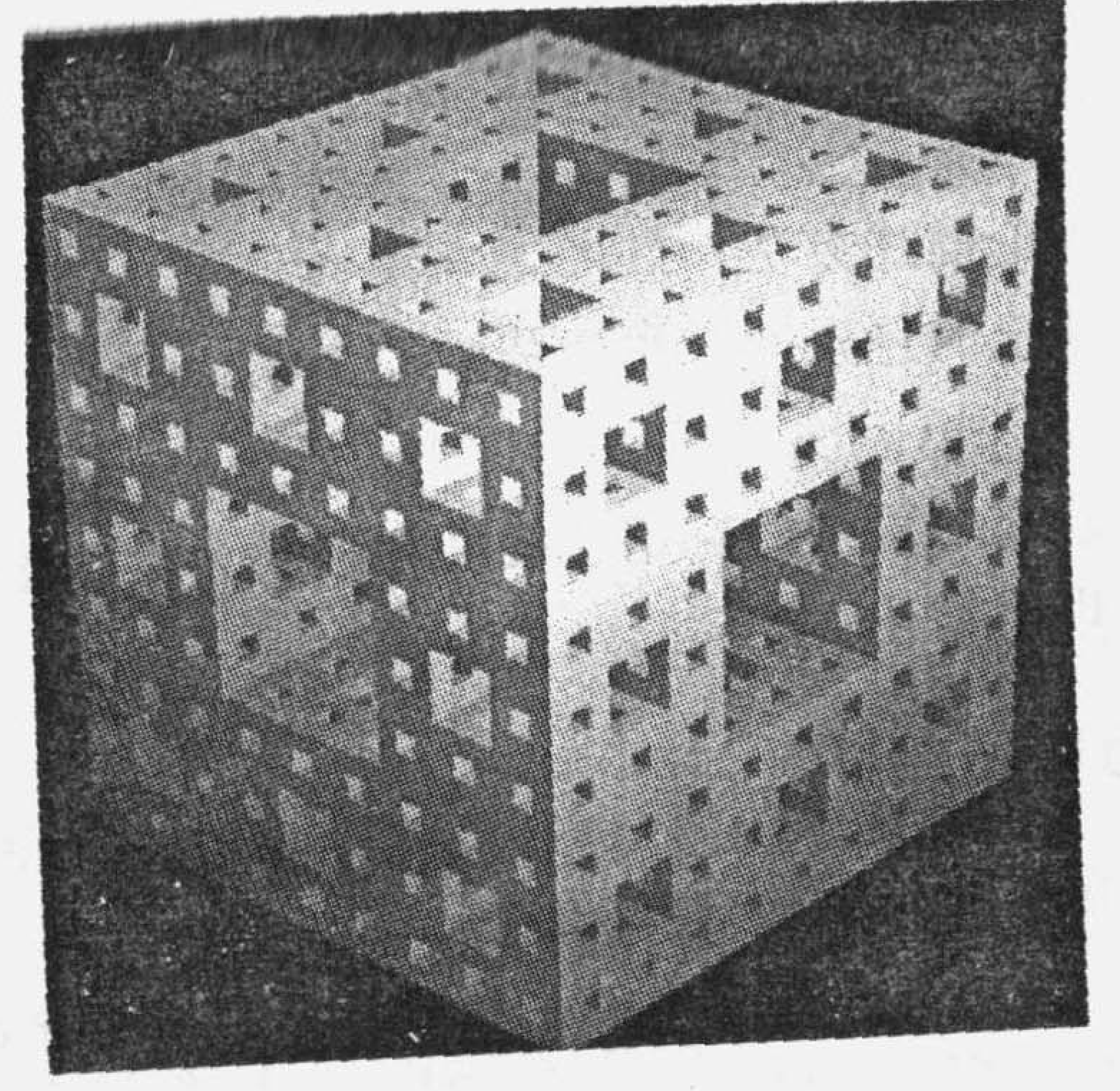


图 2-18　谢尔宾斯基/门格尔海绵

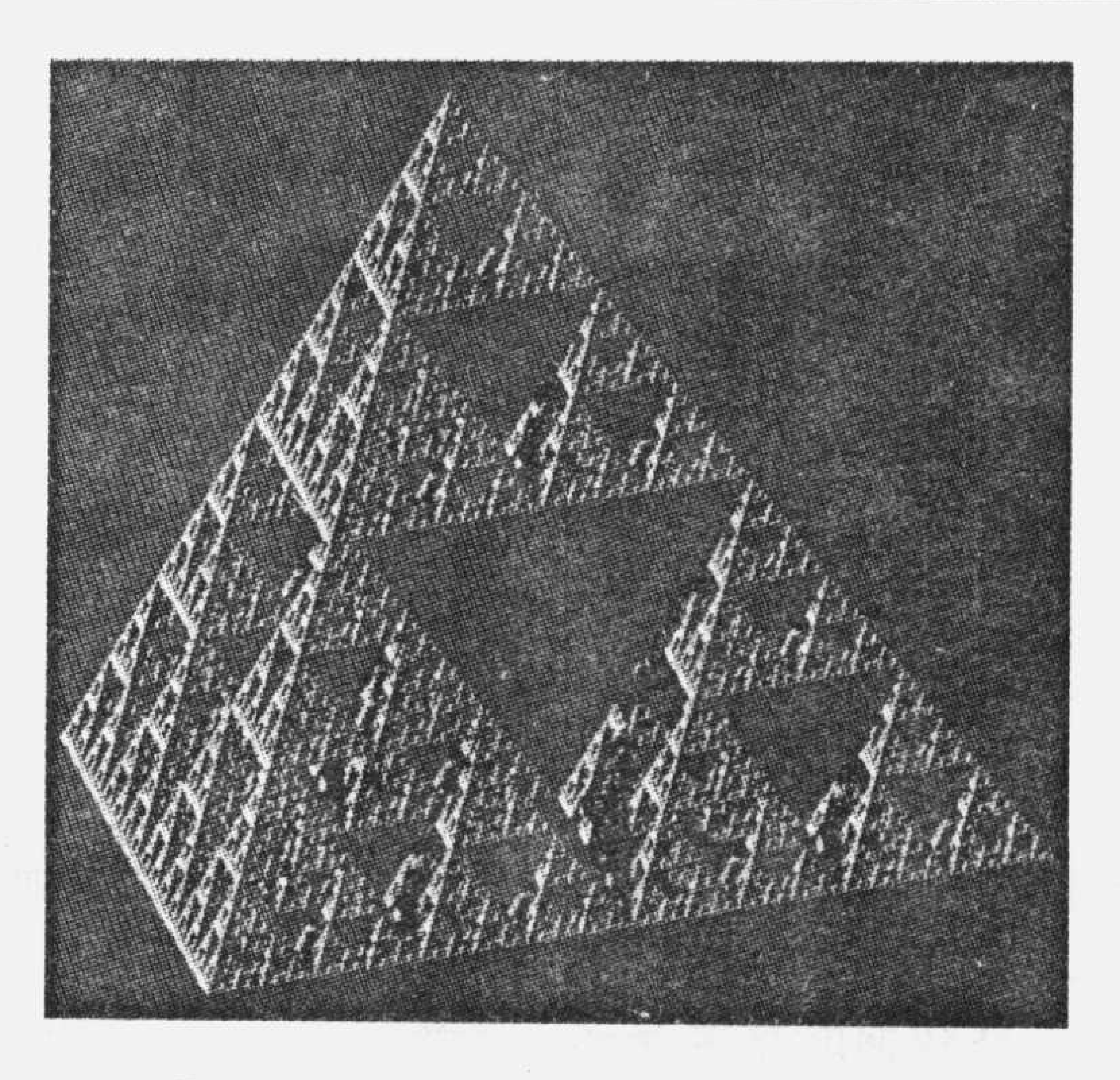


图 2 – 19　三维谢氏塔的自相似结构

2.7.1.2　复杂性的基本概念

复杂性的基本概念包括：系统与组元，系统与环境，运动与约束，非线性相互作用，正反馈与负反馈，有序与关联，分支、对称性破缺与相变，结构与功能，层次性，平衡与非平衡，守恒与耗散，能量、物质、信息的耗散，稳定性与失稳，自组织，决定论与随机性，涨落与临界现象等.

2.7.1.3　复杂性的描述

复杂性有两种理论描述方法.

(1) 守恒动力系统的复杂性：用非线性动力学，分叉、对称性破缺等理论描述.

(2) 耗散动力系统的复杂性：用非线性耗散动力学、涨落放大、分叉、自组织、耗散结构等理论描述.

2.7.2　自组织与耗散结构

下面举出两个自组织与耗散结构的例子.

(1) Benard 流：均匀对流导致本纳德花纹，混乱对流导致湍流. 这是热力学非平衡约束下的自组织（空间结构）(见图 2 – 20).

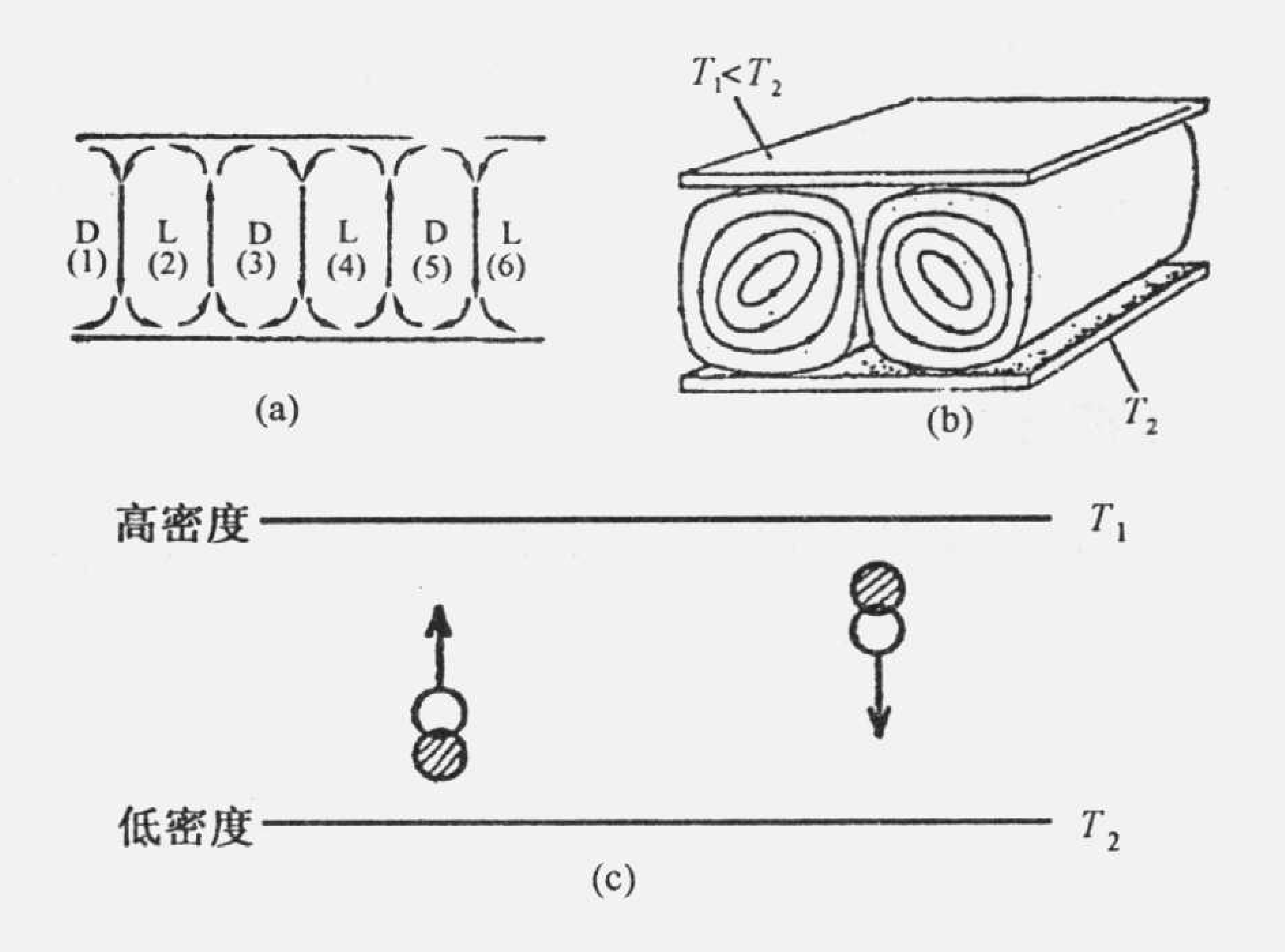


图 2-20　水对流形成本纳德花纹

(a)、(b) 均为对流（本纳德）水花，相邻两水花的旋转方向相反

(c) 为热对流产生的定性解释

(2) Belousov - Zhaotinski（BZ）反应：将硫酸铈（$Ce(SO_4)_2$）、丙二酸（$C_3H_4O_4$）和溴酸钾（$KBrO_3$）溶于硫酸，均匀搅拌，控制物质在反应器中的时间，反应物出现蓝色（Ce^{4+}）与红色（Ce^{3+}）的周期性交替变化. 这是化学非平衡约束下的自组织（时间结构）.

自组织与耗散结构的物理定义：指与外界有物质、能量、信息交换的开放系统在非平衡约束下，由非线性相互作用建立起的其组元之间稳定的长程的时-空关联结构.

自组织耗散结构由涨落诱发，由非平衡约束挑选出自组织模式，由非线性过程放大这种模式. 自组织耗散结构的维持要消耗物质、能量和信息.

自组织与耗散结构的理论描述包括协同学和耗散结构理论.

2.7.3　生物凝聚态

生物体是与外界环境有物质、能量、信息交换的开放系统，是在非平衡的物理、化学、生物、生态等约束条件下形成的具有适应性、遗传性和自我复制能力的自组织的耗散结构和过程.

2.7.4 非平衡态物理

非平衡态物理研究湍流、图案的形成、混沌、分形、微摩擦、粒状流体等现象.

2.7.5 软凝聚态物理

软凝聚态物理以复杂流体、液晶、多层膜、蛋白质的折叠等为研究对象.

【参考文献】

1 冯端，金国钧. 凝聚态物理学新论. 上海：上海科学技术出版社，1992
2 冯端，金国钧. 凝聚态物理学：上卷. 北京：高等教育出版社，2003
3 章立源. 超导理论. 北京：科学出版社，2003
4 阎守胜，甘子钊. 介观物理. 北京：北京大学出版社，1995
5 张立德，牟季英. 纳米材料和纳米结构. 北京：科学出版社，2002
6 P. W. Anderson. Basic Notions of Condensed Matter Physics. Benjamin - Clummings，Menlo Park，1984
7 哈肯. 协同学. 上海：上海科学技术出版社，1988
8 P·格兰斯道夫，I·普里戈京. 非平衡系统中的自组织. 北京：科学出版社，1986
9 G·尼科里斯，I·普里戈京. 探索复杂性. 成都：四川教育出版社，1992
10 〔美〕物理学评述委员会. 90年代的物理学：凝聚态物理学. 北京：科学出版社，1994
11 国家自然科学基金委员会. 等离子体物理. 北京：科学出版社，1994

第 3 章　原子、分子物理学与光学

3.1 引　言

量子论和相对论的建立，在很大程度上依赖于原子、分子物理学和光学提供的知识；反过来，量子论和相对论又为这些学科奠定了微观理论基础.

原子、分子物理学与光学，从原子、分子层次上研究物质的运动、变化和性质，为相邻学科和高科技的发展提供了理论方法、实验方法和基本数据.

高功率和多功能激光为原子、分子物理学与光学的研究提供了新机会：

(1) 高精度地检验基本理论（如标准模型）及测量基本常数.

(2) 对分子过程和反应动力学过程的高时间分辨率的追踪研究，利用激光频率和相位相干性来控制和引导分子过程.

(3) 高强度激光和原子与强电磁场的相互作用，推动 X 射线源和桌面粒子加速器的发展.

(4) X 射线激光和生物分子结构的 X 射线激光全息照相.

(5) 改进囚禁、冷却和控制原子的方法，精心控制和利用原子、分子之间的相互作用.

(6) 利用玻色－爱因斯坦凝聚发展原子激光，用于制作计算机芯片、纳米机电系统和量子计算机.

(7) 飞秒（10^{-15}s）高功率激光开创了快化学过程的时间分辨研究和激光诱导化学反应方法，其超强电磁场可以从原子中剥离电子并加速到很高能量；对碰撞对象初始量子态的控制和对碰撞产物角分布的精密测量，使完全的碰撞实验成为可能，并可提供最详细的截面数据.

3.2 原子结构与原子动力学

原子物理学有三个主要的研究分支：

(1) 物理学基本定律，即相对论和量子论以及粒子物理标准模型的高精度

检验；

(2) 原子的结构及其与光的相互作用；

(3) 原子与原子、电子、离子碰撞和相互作用的动力学.

3.2.1 原子结构

原子结构指原子中电子的量子运动，这是复杂的量子多体问题（研究原子的束缚态）.

原子光谱：原子中电子的量子态跃迁产生的光子的能谱（频率、线宽、强度、偏振等），携带了电子的量子运动的信息，因此可从原子光谱了解原子结构.

高离化态离子的电子结构：研究相对论效应、QED效应，以及多荷离子光谱学.

松束缚原子：如微米尺度（10^{-6}m）的里德伯态原子和负离子，它们的电子关联显著.

双阱等效原子势：有些原子的内层电子势能有两个被势垒隔开的极小，形成两个互相竞争的状态．受扰动时，电子在两个状态达到细致平衡，如 Ba^{2+} 出现奇特的现象.

强电磁场中的原子：强电磁场不仅强烈地扰动了原子自身的库仑场，而且改变了体系原有的对称性并引进新的动力学对称性，使体系中出现原子库仑场和外界电磁场共同支配下的新的结构和运动形式.

强磁场中的氢原子会出现由原子核电场和外界磁场共同支配的从规则运动向混沌运动的转化，该问题至今未得到完全解决.

原子体系的瞬态：指描述多电子体系的时间有关的动力学过程，其中包括电子-电子关联、电子-原子核的能量、动量交换、准分子态、连续态与束缚态之间的耦合、时间有关动力学过程中的（近似）守恒定律和隐蔽的对称性．使用交叉粒子束碰撞、粒子阱和飞秒激光等技术可实现对上述过程的研究.

多电子动力学：研究多电子关联与集团运动（如 H^- 的双电子关联态），高激发态原子，空心原子光谱学，原子、分子的多光子吸收与激发.

相对论效应与QED效应：二者主要影响重元素内层电子，通过内层电子（轨道收缩）影响外层电子．对于周期表中第六和第七类元素，相对论效应不可忽视.

原子结构问题：就是用QED效应处理多电子问题，当前的困难是如何使

用多体系统的相对论性哈密顿量对结合态中的推迟效应加以正确的处理.

3.2.2 原子动力学

原子动力学的任务是研究原子碰撞、相互作用引起的变化和反应的过程与规律，并用碰撞和反应截面（几率）对这些过程加以描述. 结构和光谱学研究的是定态和束缚态，而碰撞、散射与反应动力学研究的是瞬态和非结合态，二者互为补充.

碰撞的种类：碰撞包括弹性散射、共振散射、非弹性散射、复合反应等. 上述种类是按碰撞时间和内部运动模式的特征响应时间来划分的.

电子 - 原子（离子）碰撞（电子能量 E_e 高于电离阈值）：必须考虑电子连续能谱的共振结构和多电子共振态.

双电子复合的反应过程如下：电子 + 离子导致离子的价电子激发变成里德伯电子，随后离子的价电子辐射，双电子复合完成. 这一过程要求 E_e 略低于离子激发能，它是等离子体中发生的重要过程.

超慢碰撞：在超慢碰撞中，相对运动速率比内部运动的特征速率小，碰撞时系统绝热演化，可研究与绝热运动相关的奇特现象和多电子关联.

分子与里德伯原子碰撞：研究分子振动能以及转动能向电子激发能的转移.

多电子原子与多电子原子的碰撞：研究对称性导致的近似守恒定律.

正负电子散射的比较：奇异的现象是，低能电子对 He，H_2 的散射截面比相应的正电子的散射截面大 100 倍，在能量高于 125eV 时趋于一致.

$U^{92+} + U^{92+}$ 碰撞中产生正负电子对：当原子核的电荷数 $Z \geqslant 173$ 时，核电荷周围的真空变得不稳定，真空中存在正负电子对时能量反而更低，这时，超强电场会撕裂真空产生正负电子对.

原子内层空位的产生：原子的内层电子通过原子碰撞形成分子轨道并转移到高能级，从而在内层形成电子空位.

3.2.3 近期发展

（1）激光囚禁和冷却原子与离子（温度小于 1μK）提供了一种操纵和控制原子与离子的有效方法.

（2）原子囚禁开辟了高精度光谱测量，提高了对基本物理常数测量的精度；同时也改进了原子钟的精度，并提出了原子喷泉的设想.

（3）基于激光囚禁和冷却原子的技术，实现了玻色－爱因斯坦凝聚．人们在 1995 年观察到 Rb，Na，Li 等原子的 BEC 凝聚，在 1998 年观察到 H 的凝聚．

3.3 高精度测量与基本定律的检验

3.3.1 高精度测量

原子时钟的稳定性已高于 1×10^{-14}，氢的 1s→2s 能级跃迁的频率测量精度已达 3×10^{-13}；对电子反常磁矩的测量精度达到 4×10^{-8}，确认了正负电子的磁矩在 5×10^{-11}范围内相等；对里德伯常数和氢的 1s 能级的兰姆位移（精度达 9×10^{-6}以上）的持续一年的高精度测量，将给精细结构常数的宇宙学变化确定一个新的极限．

3.3.2 对基本定律（如弱电统一理论）的检验

1997 年，人们用 Ce 原子束激光实验检验宇称不守恒的精度达到 3.5×10^{-4}．对电荷共轭－宇称－时间反演（CPT）不变性的验证精度达到 1×10^{-13}．1997 年，人们还直接测到了 Casimir 吸引力；对铀的类氢、类氦离子 U^{91+}、U^{90+} 的兰姆位移的精密测量，验证了强库仑场中的 QED 高阶效应．

3.4 分子结构与分子动力学

分子物理学的任务是了解基本分子的行为，包括对分子结构与分子碰撞和反应动力学的研究．

分子物理学跨越物理学和化学两个学科，是物理学通向化学的桥梁．

分子物理学研究的主要手段是激光光谱技术和分子束技术，凭此技术，可以制备简单分子的任何所需的量子态，产生新分子种．

3.4.1 分子结构

研究分子结构的目标是对分子中三种量子的运动形态有详细的了解，包括分子中电子的量子运动，分子中原子核的振动和转动．电子运动包括单电子运动和多电子关联运动，振动和转动则涉及原子核的集体运动．

（1）孤立分子物理学：用可调谐的激光、同步辐射激光和分子束技术，可

制备处于所需量子态的简单分子并研究其结构，具体包括：简单分子的基本成键和电子特性，电子与核在分子场中的联合运动，分子受激的产生、演化和衰变，瞬态新分子种如强活性的离子、自由基和亚稳分子，以及能量在分子各振动模式间的流动.

(2) 里德伯分子：为高激发态分子，一个里德伯能级上的电子所处的轨道半径比分子的离子实半径大很多，而且该轨道是非球形、可极化的，原子核的振动和转动的频率比里德伯电子的运动频率快，绝热近似失效.

(3) 长程分子：对处于高振动态的分子来说，原子核的最大分离距离是原子半径的 5 倍多，长程力决定了原子 - 原子复合率与非弹性碰撞截面以及气体输运系数.

(4) 开壳分子：在这类分子中，有一个原子（过渡金属或稀土原子）的电子内壳层未被填满，该原子实因为具有角动量而表现为各向异性，对化学环境敏感，具有众多的低能级电子态.

(5) 氢键分子：氢键分子中的氢键与离子偶极键一样，是最重要的分子化学结合力，它控制着对生命极为重要的从水到 DNA 之类物质的性质. 氢键对环境敏感，应在气态情况下研究. 生物分子中掺杂了具有氢键的杂质后，显示半导体性质.

(6) 多原子分子的振动结构：在多原子分子中，简谐振动近似失效，出现大振幅振动和非线性效应. 能量在分子中的局域性分布状况，振动 - 转动的精细结构，以及分子离子（中性分子加一个质子或电子）都是有趣的研究课题. 分子离子在溶液化学、大气化学、星际介质和火焰的研究中起关键作用.

(7) 范德瓦耳斯分子：范德瓦耳斯分子是弱键分子，由稳定分子和惰性原子组成，靠很弱的范德瓦耳斯力结合成分子.

3.4.2　分子碰撞和反应动力学

(1) 人们用皮秒（10^{-12}s）和飞秒（10^{-15}s）激光脉冲技术与分子束技术研究在确定的量子态下原子 - 分子碰撞时电子的相关运动.

在碰撞中，炮弹和靶的相对运动的能量和角动量转化为分子内部运动的能量与角动量，引起分子内部的激发和各种反应，使分子从一个量子态向另一个量子态跃迁，并造成电子运动和原子核的振动、转动之间的耦合与能量转移. 原子 - 分子碰撞中的能量、动量和角动量（平动、振动和转动能量）的转移过程是研究的重点.

(2) 在激光场中的碰撞：科研人员目前正研究激光的吸收与发射对碰撞、反应过程的影响，开辟用激光控制反应产物的道路；并用多光子吸收产生的离解来研究（半碰撞的）分离碎片的动力学.

(3) 冷分子离子的库仑爆发成像：高速分子、离子穿过薄箔，电子（对振动、转动而言）瞬间被剥离，几个原子核发生库仑爆炸，测量碎片速度可得振动与转动的瞬间几何构形，如测得 CH_2 的弯折角为 140°，弯折能为 0.1eV.

(4) 分子的光致电离：分子吸收光子而发射出电子，有以下三种情况：

①分子自电离：分子吸收光子后，处于分离的正能态——由一个受激的里德伯电子和一个受激的离子组成的量子态，离子把激发能转给里德伯电子而使其逃离分子. 离子的激发可以是电子激发、振动激发或转动激发.

②分子场中的形状共振：在分子平均场和电子的离心势形成的位垒束缚下形成分子的准束缚量子态，电子随后通过量子隧穿而逃离分子. 由于分子平均场很强，分子对环境的变化不敏感. 形状共振是揭示中短程分子力的有力工具.

③共振多光子电离：在强激光作用下，分子可吸收多个光子而激发振动、转动能级，然后发射电子，出现共振性多光子电离. 共振多光子电离现象可用来探测高激发态.

(5) 电子 - 分子碰撞：电子 - 分子碰撞类似于电子 - 原子碰撞，可产生丰富的不同种类的共振结构. 由于分子存在偶极矩、四极矩等高阶矩，且分子场是各向异性的，加之原子核运动的参与，就使现象更为丰富.

(6) 态 - 态化学：态 - 态化学反应能测得化学反应的初态和末态的所有重要的量子数，已在最基本的分子碰撞中实现. 这一反应依靠的实验手段是：①具有极窄的速度分布和很低内部温度（几开）的高强度超声分子束；②对量子态高分辨率的可调谐的染料激光器. 对于 HD + He 碰撞，已测得从单一转动态到每一个末态的具有很高分辨率的微分截面. 转动的态 - 态碰撞是分子体系最基本的能量转移形式，在超声膨胀、气体激光器、大气物理等方面起决定性作用.

(7) 辐射碰撞：辐射场中的碰撞过程不同于真空中的碰撞，辐射场参与了碰撞的中间过程进而影响了碰撞结果. 例如，激发态锶与基态钙的碰撞，没有染料强激光辐照时是弹性碰撞；有辐照时，激发能从锶转移到钙，激光和碰撞过程中形成的分子能级发生共振. 辐射碰撞与一系列基本分子现象有关，具有应用价值. 辐射对生物（生化过程）的影响与此有关.

(8) 极低温反应反常：$NH_3^+ + H_2 \rightarrow NH_4^+ + H$ 反应，随温度下降有一极小值，然后迅速增长．在星际介质中（温度 10K~20K），这一反应很重要．

3.5　介质环境中的原子和分子

3.5.1　固体中的杂质原子

晶体场要改变杂质原子的电子结构．在晶体场中，电子的有效质量变了，电子间的等效相互作用变了，因而原子（离子）的结构也变了．从实验已知固体中杂质原子的外层电子，其能级和相应的红外光谱要发生变化．

3.5.2　液体（水）中的杂质分子

液体分子场也要改变杂质分子的键性质，特别是生物分子的氢键对环境十分敏感．已知水会引起生物大分子三级结构的变化．

3.6　原子的控制与操纵——分子剪切与原子组装

3.6.1　控制和操纵的手段

控制与操纵原子的手段有以下几种：

(1) 电磁陷阱囚禁粒子技术．

(2) 激光技术：激光镊子，激光定向量子态激发．

(3) 激光囚禁与激光冷却原子技术．

(4) 量子阱、人造势场及边界条件对电子和原子的控制．

(5) 利用隧道扫描探针对原子的操纵．

(6) 分子束外延技术．

(7) 控制原子和光子的微腔技术．

3.6.2　控制和操纵原子的类型

(1) 量子态定向激发：量子跃迁的控制．

(2) 空间维度的控制：准二维、准一维、准零维系统．

(3) 势场的控制：粒子量子运动的控制．

（4）边界条件的控制：粒子量子运动的控制.

（5）原子、分子的剪切和搬运.

（6）原子、分子的组装.

（7）原子寿命和稳定性的控制.

3.6.3 实　例

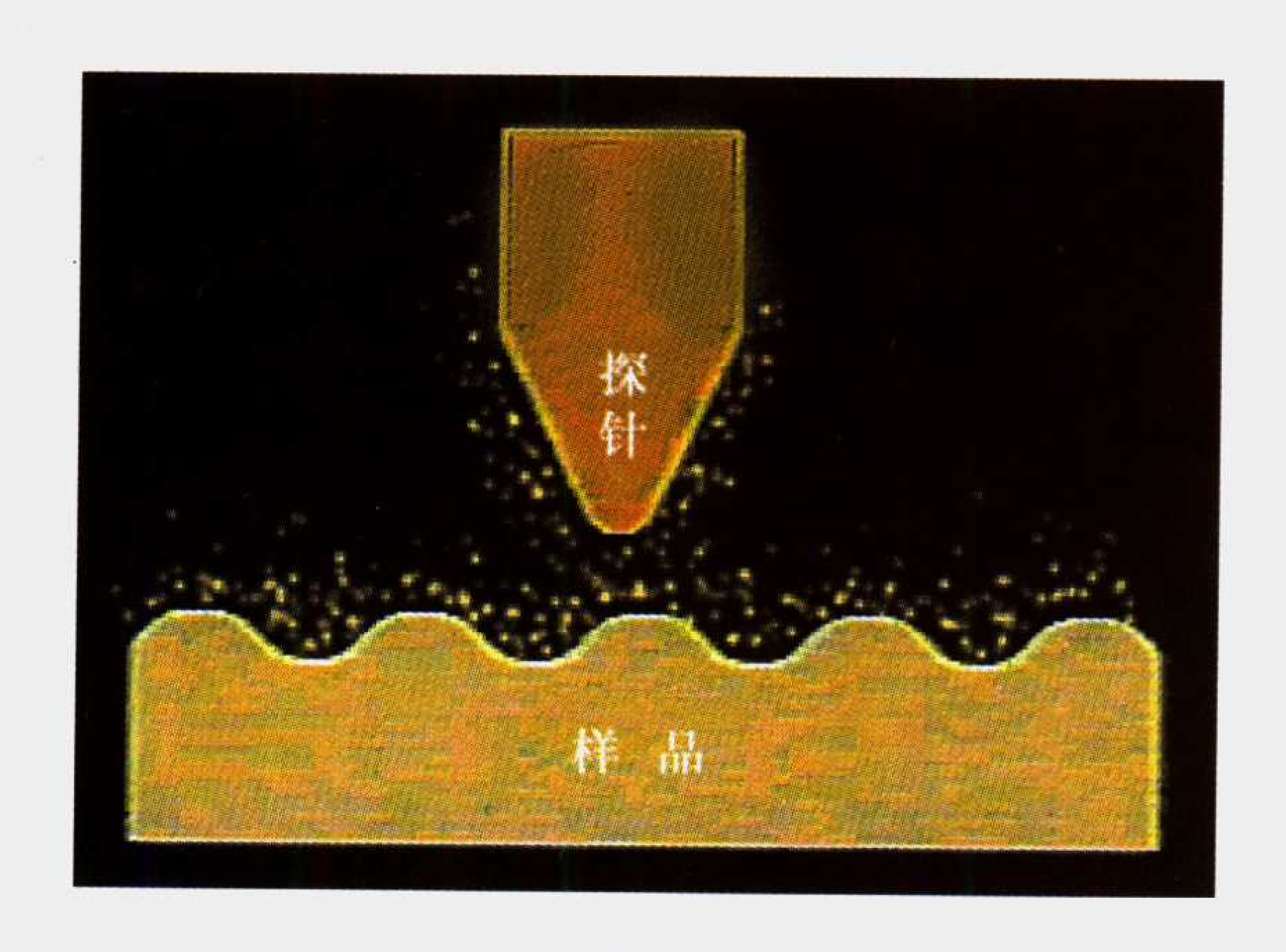


图 3－1　样品表面与针尖的电子云图

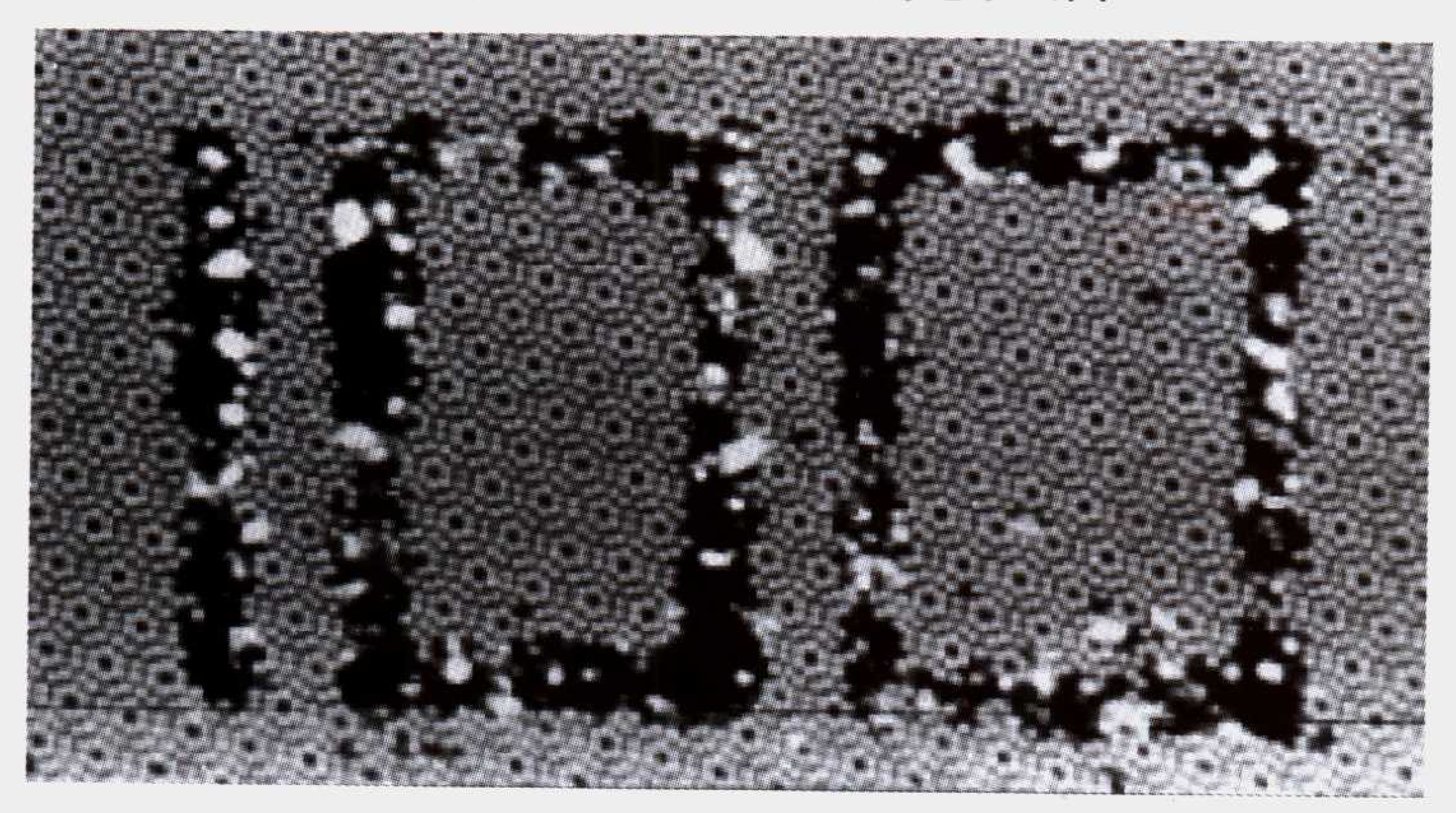


图 3－2　1994 年初，中国科学院真空物理实验室的研究人员成功地利用一种新的表面原子操纵方法，通过 STM 在硅单晶表面上直接提走硅原子，形成平均宽度为 2nm（3～4 个原子）的线条．从 STM 获得的照片上可以清晰地看到由这些线条形成的“100”字样和硅原子晶格整齐排列的背景

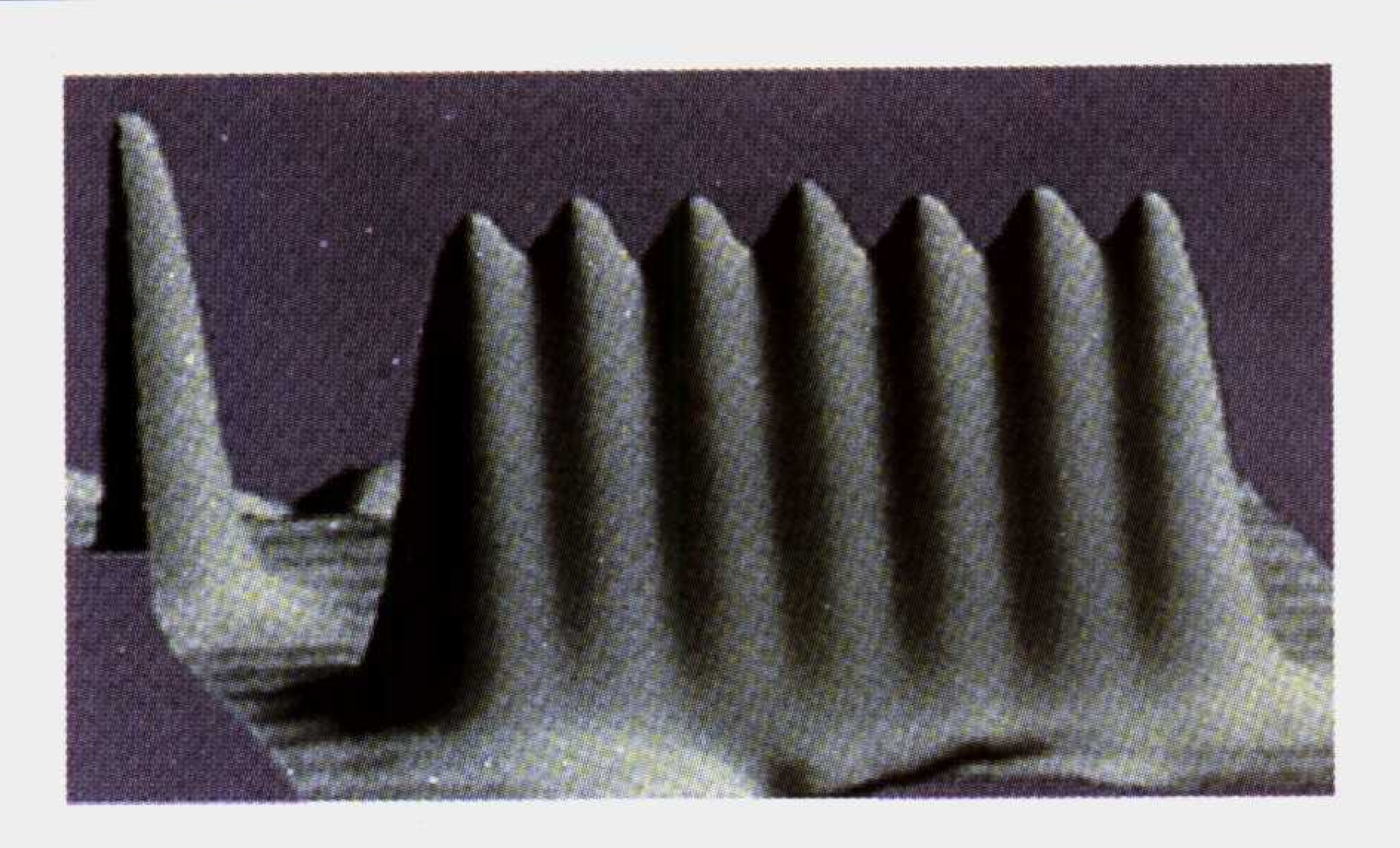


图 3－3　单个氙原子（尺度为 0.1nm）已被排成了一列

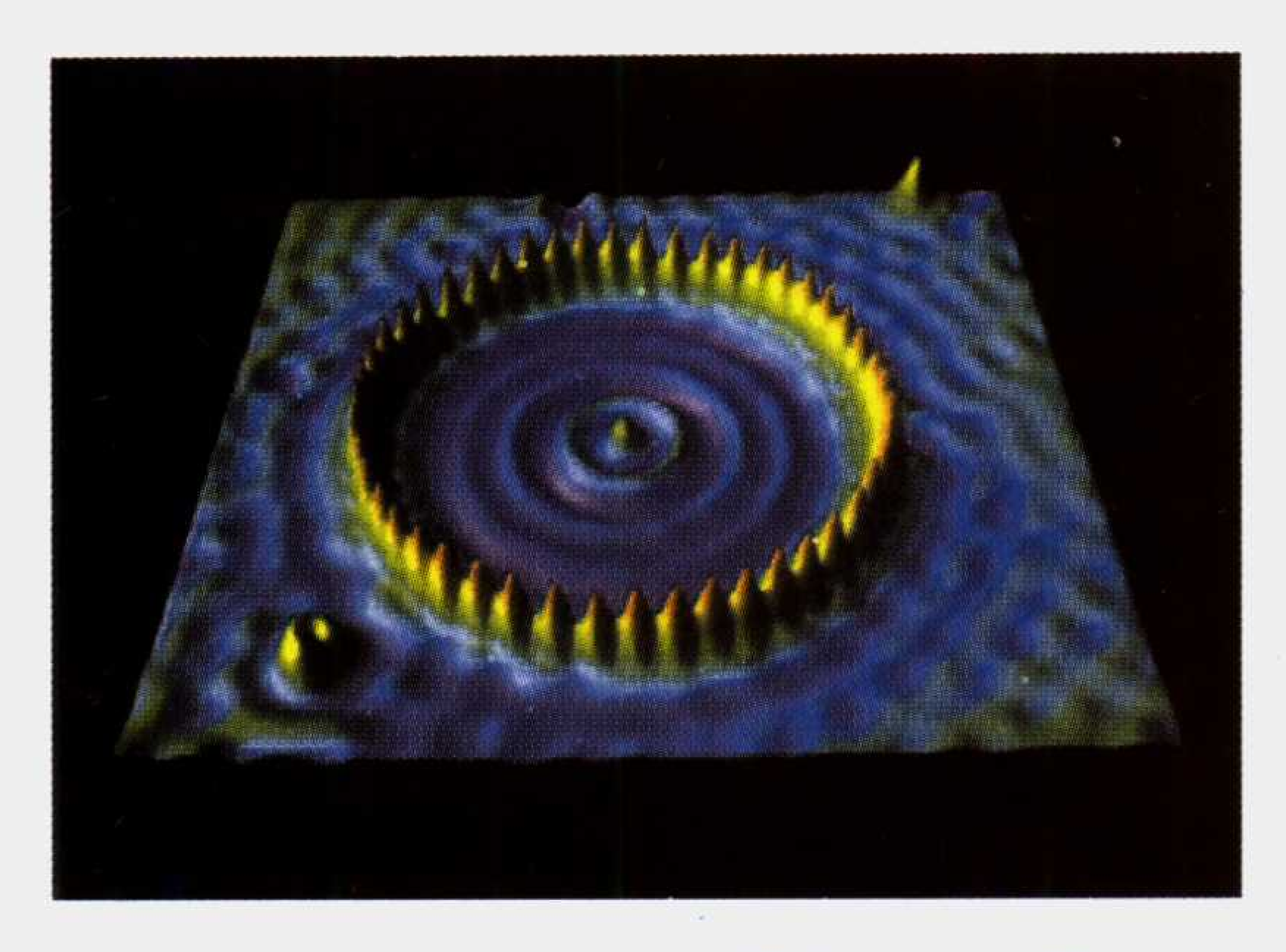


图 3－4　用扫描隧道显微镜搬动 48 个 Fe 原子到 Cu 表面上构成的量子围栏

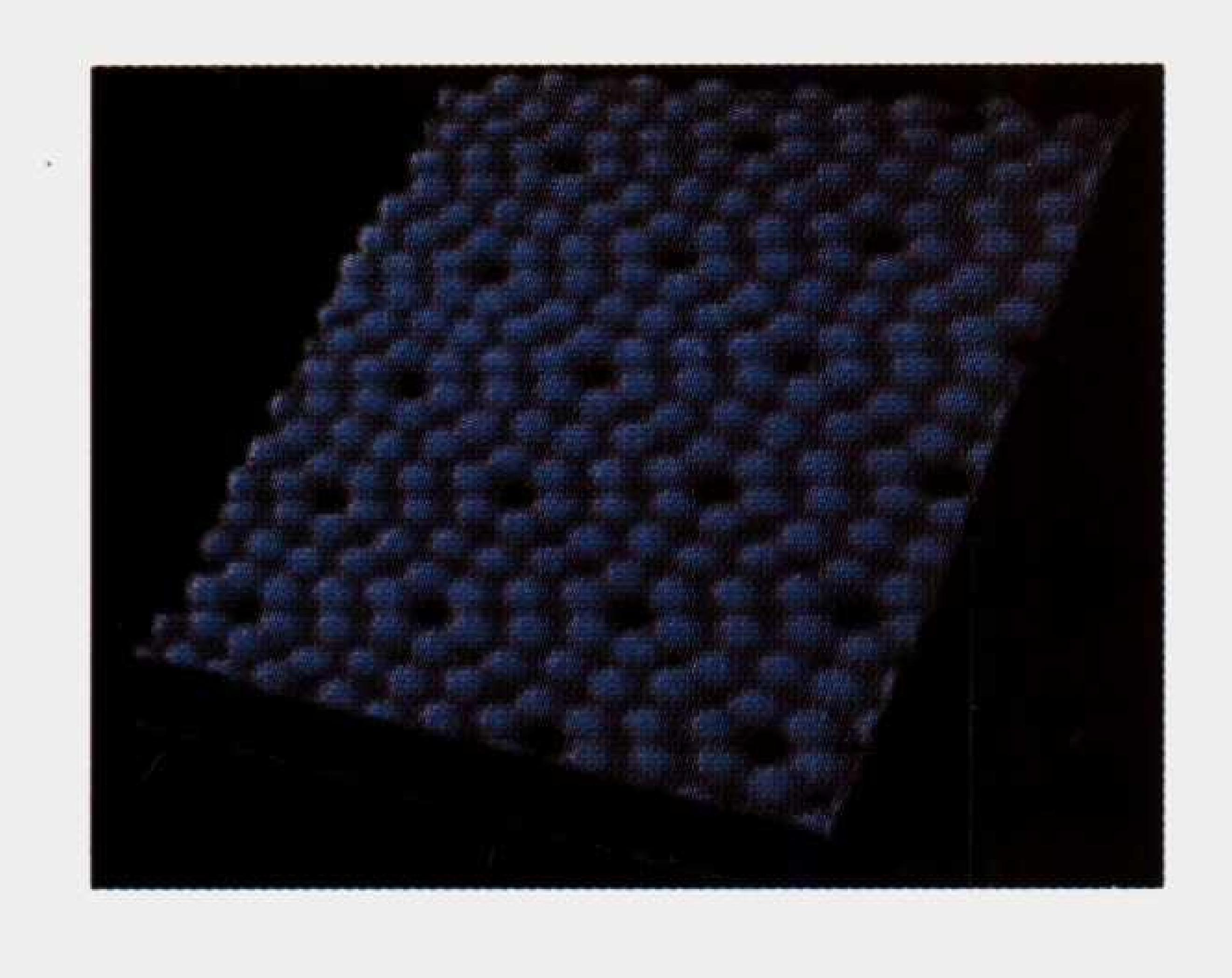


图 3－5　硅表面 7×7 重构图

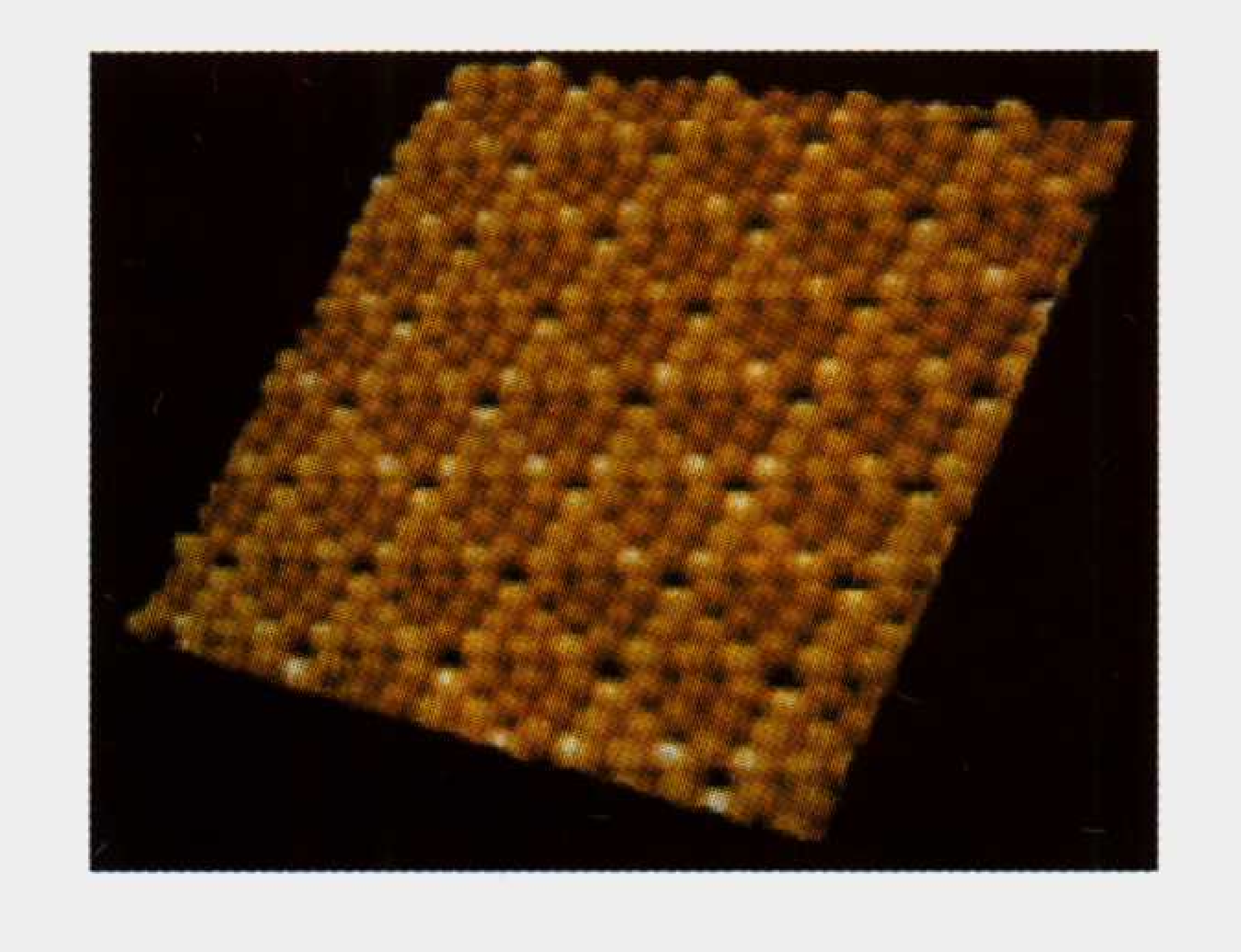


图 3－6　硅表面硅原子的排列

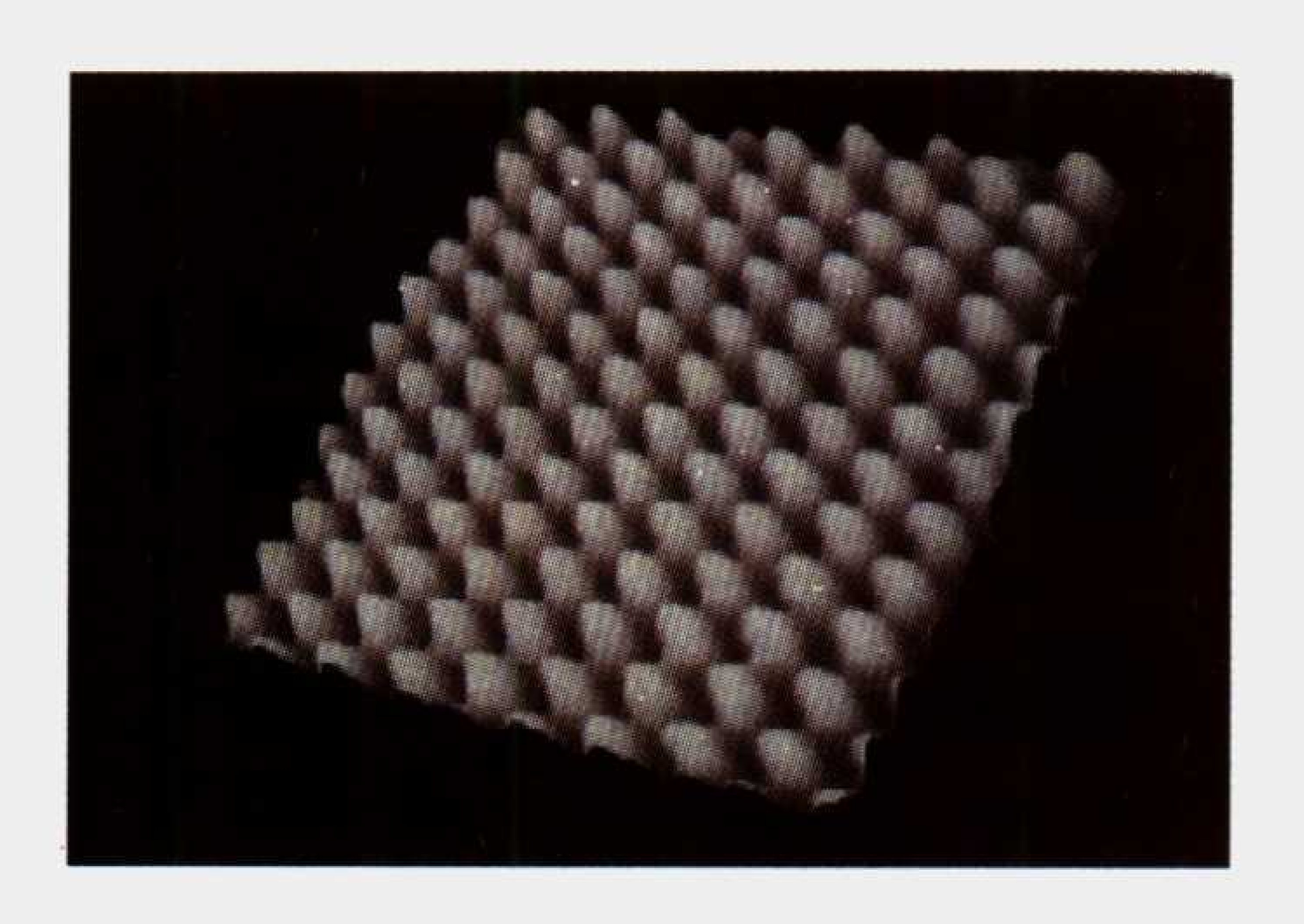


图 3-7　用扫描隧道显微镜观察到砷化镓表面砷原子的排列

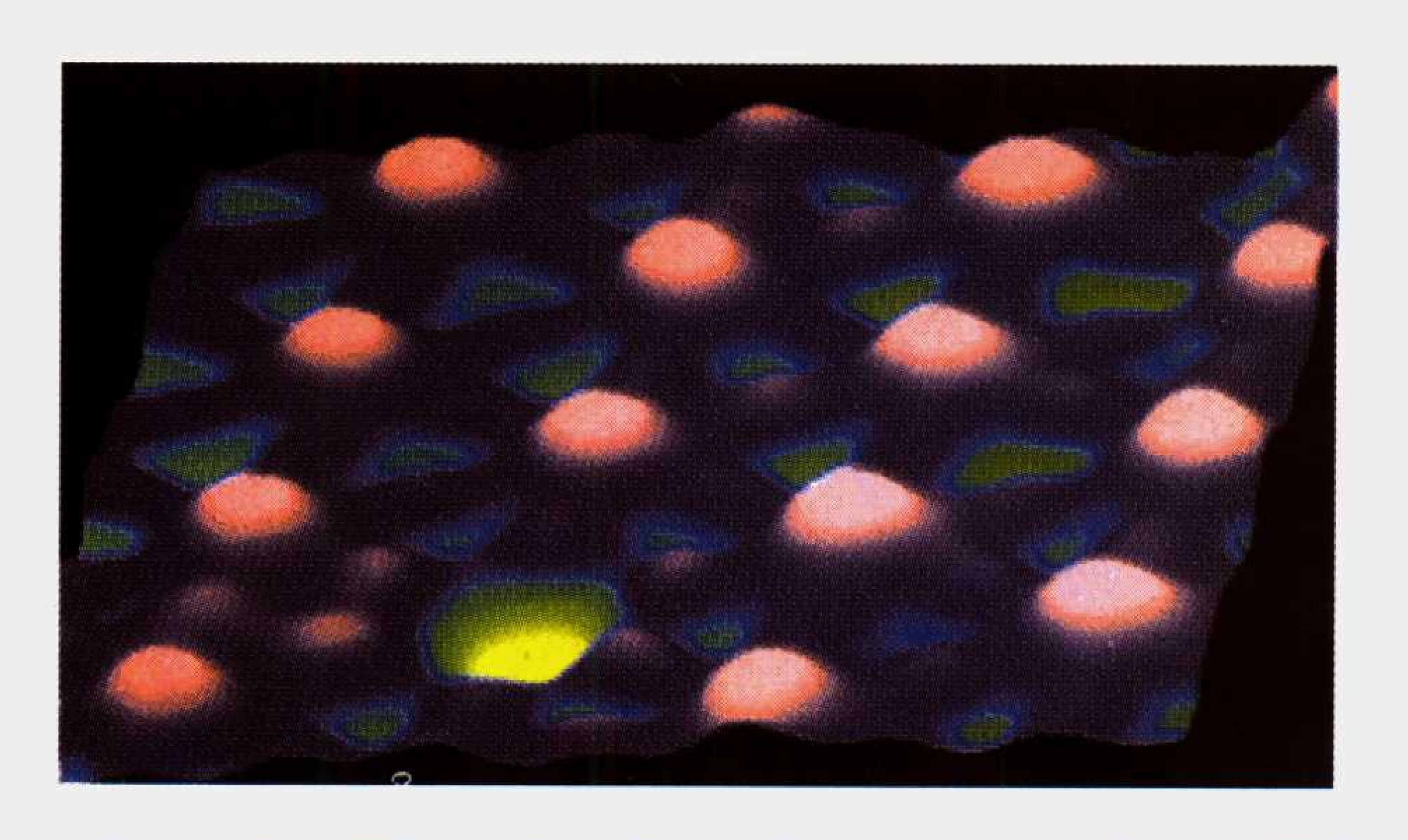


图 3-8　吸附在铂单晶表面上的碘原子 3×3 阵列 STM 图像

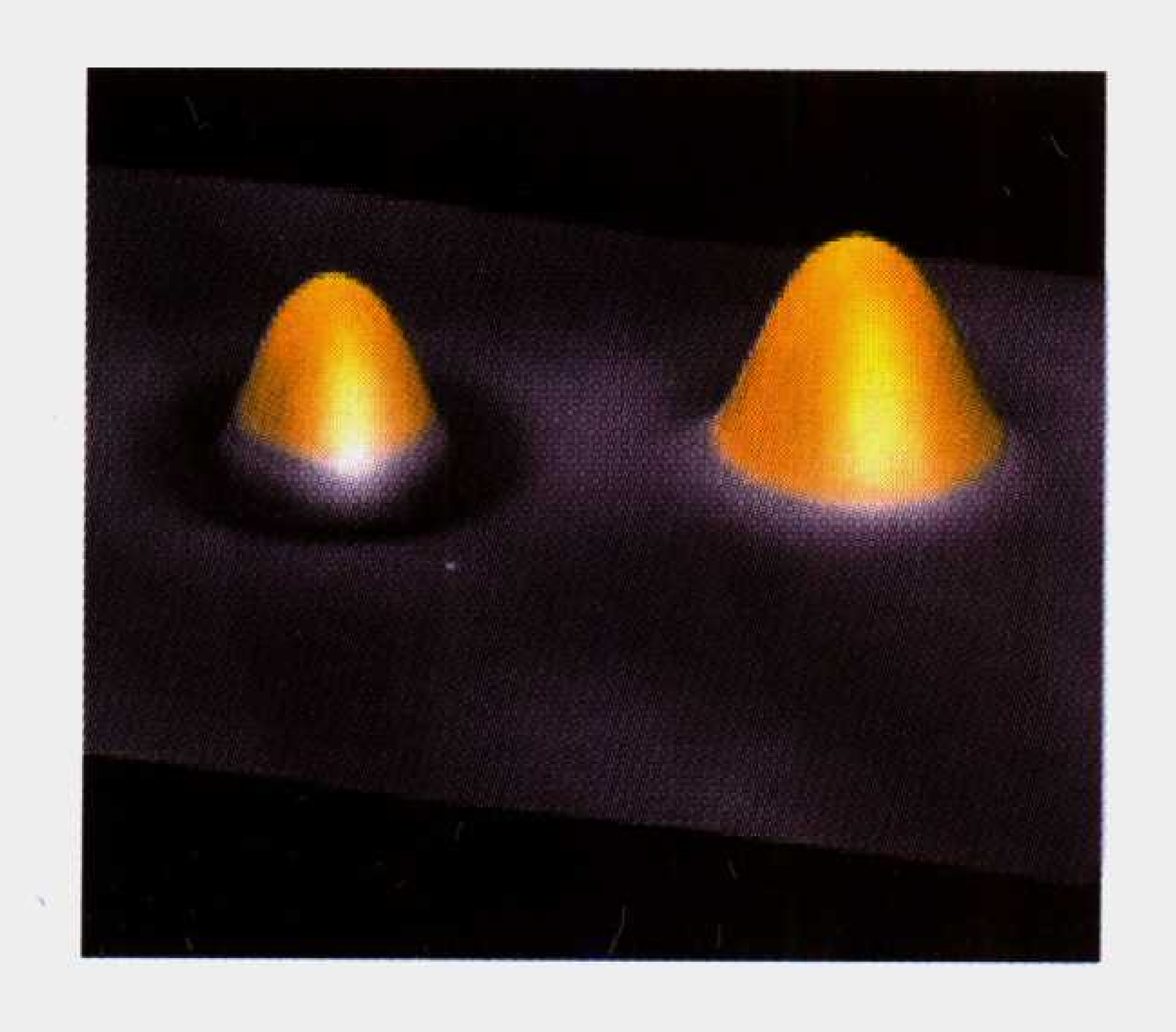


图 3-9　扫描隧道图像显示的一个中性金原子（右侧）与一个带负电荷的金原子相伴

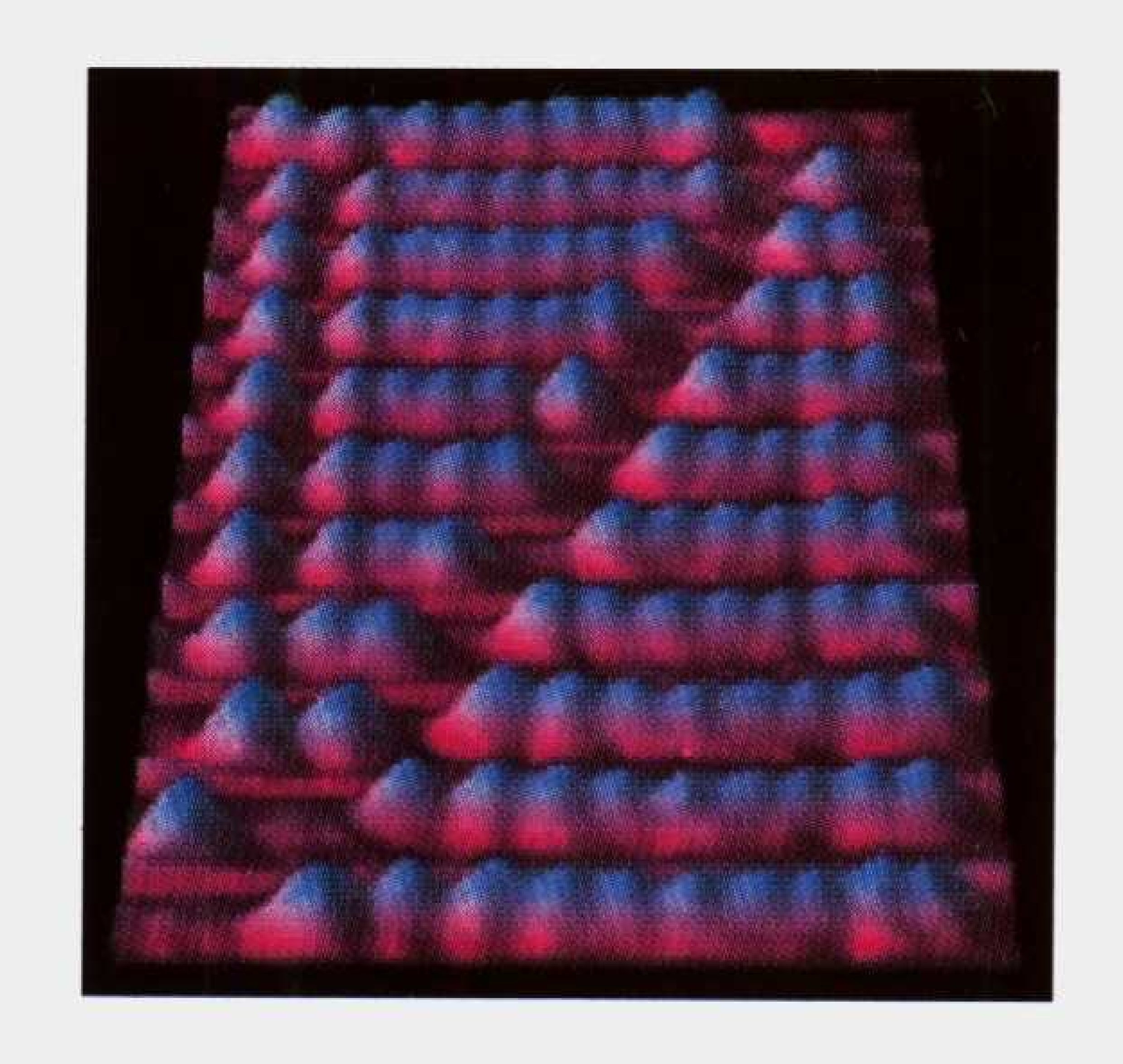


图 3-10　纳米神算子——分子算盘

3.7 光　学

3.7.1 现代光学

光学是关于电磁辐射和光与物质相互作用的物理学，它包含光的产生和检测、线性和非线性光学过程以及光谱学．与光学有关的产品价值已占到美国国内生产总值（GNP）的 20%．新型激光器、新颖光源、光谱学、非线性光学推动了现代光学的发展，并将进一步推动光学的发展．

目前已有的新型光源包括：半导体二极管激光器（用于红外光谱学和光纤通讯）、可调谐染料激光器（导致高分辨率光谱学革命，可用于制备新的原子、分子和离子态）、准分子激光器（工作物质是惰性气体卤化物，如 XeF 非束缚的范德瓦耳斯分子，能量储存于电子激发态）、自由电子激光器（相对论性电子在周期性偏转磁场——摇摆器中辐射的从红外到紫外的高强度的相干辐射）、铷玻璃激光器（可用于超强激光诱发核聚变）、基于激光的紫外和 X 射线源，以及同步辐射光源等．

人们还希望找到从远红外到 X 射线的高效率的新型激光器，发明新的相干倍频技术（用多光子激发和内壳激发产生），产生从远紫外到 X 射线的短波激光辐射，发展超强超快的飞秒脉冲技术．

3.7.2 光学的主要分支学科

3.7.2.1 激光光谱学

超精密激光光谱学：染料激光器的稳定度和光纯度已达到 1×10^{-12}，波长测量精度达到 1×10^{-8}．

超灵敏光谱学：运用强激光共振光致电离，可以激发和探测到单个原子；利用物质对激光的吸收谱，可测出微量物质．

无多普勒效应的激光光谱学：用正反两束激光进行光谱检测，可消除一阶多普勒效应，但二阶多普勒效应仍然存在．

激光制冷：二阶多普勒效应与粒子能量成正比，可通过激光制冷（到 mK 以下）来解决．

超窄光学跃迁：把光激发的杂质原子嵌在固体中，使之没有反冲时，谱线

变得很窄，类似于穆斯堡尔效应.

相干拉曼光谱学：用激光代替普通光散射进行拉曼光谱学检测，可排除荧光和背景光的干扰.

3.7.2.2 量子光学

量子光学研究中运用微腔场等技术控制原子的激发和光子的统计性质，产生新型相干态（如各种压缩态、反聚束等非经典激光）；并研制光学双稳器件与光学逻辑元件；研究原子与超强激光相互作用等非线性光学现象.

3.7.2.3 腔场量子电动力学

腔场量子电动力学研究处于里德伯高激发态的原子与微腔的微波和毫米波辐射相互作用的动力学；通过微腔技术改变电磁真空状态，控制辐射过程与原子的衰变行为和寿命.

3.7.2.4 飞秒激光谱学

飞秒激光谱学可用于追踪分子振动、转动、非平衡、化学反应等过程. 飞秒激光脉冲已达 10^{-15}s，仅几个波长. 追踪对象的特征时间如下：①分子振动周期为 10^{-14}s ~ 10^{-13}s；②转动周期比振动周期长；③半导体中电子的热平衡弛豫时间为 10^{-14}s ~ 10^{-13}s；④分子中质子和电子的转移时间为 10^{-14}s ~ 10^{-15}s.

3.7.2.5 强激光

强激光可通过啁啾放大技术获得：种子脉冲→展宽→放大→压缩→展宽→压缩，功率可提高 8 个量级.

神光一号：1.4TW/2.4fs，6×10^{17}W/cm^2.

神光二号：20TW/2.4fs，3×10^{19}W/cm^2.

原子核附近的电场：10^9V/cm.

强激光的电场：大于 10^9V/cm.

激光核聚变：是靠激光产生的高温、压缩、超强电场引发的加速和碰撞效应，达到核聚变条件.

激光加速：靠超强电场加速带电离子，可产生兆电子伏特数量级的电子，用于设计小型桌面加速器.

3.7.2.6　非线性光学

利用单晶材料和微结构材料，可产生非线性光学性质，实现对光的振幅、向位、频率、偏振的控制．

3.7.2.7　光子晶体

光子晶体对光波形成介电常数，使光波在周期场中传播，导致光子产生能带结构．

3.7.3　电磁场引起的透明（EIT)

电磁场引起的透明是利用三能级原子与两束激光作用，其中耦合激光束抑止原子向高能级跃迁，使试验激光束无吸收地透过原子介质，同时介质中的光速变慢，产生很强的非线性效应．这一技术可实现光能的储存，光信息在原子体系中的相干储存、转换与加工．

【参考文献】

1 P. Black，G. Drake，L. Jossem 著，赵凯华等译．物理 2000：进入新千年的物理学．北京：北京大学出版社，2000

2 〔美〕物理学评述委员会．90 年代物理学：原子、分子物理学和光学．北京：科学出版社，1993

3 国家自然科学基金委员会．自然科学学科发展战略调研报告：光物理学．北京：科学出版社，1994

4 张哲华，刘莲君．量子力学与原子物理学．武汉：武汉大学出版社，2004

附录　德国 Max - Planck 核物理研究所（Heidelberg）原子 - 分子物理研究现状（2000—2001）

Ⅰ. 该所当前的研究方向

（ⅰ）粒子物理、中微子物理、宇宙射线物理（γ 射线天文学）（与 CERN、GSI 合作）.

（ⅱ）核物理、重离子物理、放射性核物理（与 GSI 合作）.

（ⅲ）原子、分子物理（与 Kassel 大学合作）.

（ⅳ）核生物与核医学（与 GSI、Heidelberg 大学合作）.

（ⅴ）大气与环境科学.

（ⅵ）核考古学（与中科院长沙地质所，中国科技大学考古系有合作）.

在以上研究中，实验与理论结合密切.

Ⅱ. TSR（Testing Storage Ring）上的电子碰撞与原子离子谱学

主要设备：强流冷离子束 TSR（最近又有电子束离子阱），带有冷磁约束电子束的 TSR 电子冷却器.

相对能量：几毫电子伏特至几千电子伏特；$kT_{\perp} \approx 5\text{meV} \sim 10\text{meV}$，$kT_{/\!/} \approx 0.1\text{meV}$.

电子密度：$10^7\text{cm}^{-3} \sim 10^9\text{cm}^{-3}$.

特别适合研究非弹性电子 - 离子碰撞与电子 - 离子复合（recombination）.

（ⅰ）低能电子 - 离子辐射复合.

低能单电子俘获动力学具有很高（1.5 ~ 10 倍）的复合率：

$$C^{6+}、Fe^{6+}：\Delta\alpha/\alpha_0 = 2.0，1.85.$$

其增强规律为：

$$\Delta\alpha \propto T_{\perp}^{-1/2}，\Delta\alpha \propto T_{/\!/}^{-1/2}，\Delta\alpha T_{\perp}^{1/2} T_{/\!/}^{1/2} \propto B^{1/2}.$$

这与离子的电子结构无关，电子密度测量排除三体复合增强，其机理还不清楚，非共振辐射电子共振复合（RR），非外场影响.

（ⅱ）双电子复合（DR）.

高能电子在不完全剥离离子上的共振俘获是最有效的复合机制，它能导致

具有高度结构的双电子复合谱（双电子共振激发与退激发），多电子系统的基本量子过程，以及宇宙等离子体中的过程.

类 Li 系统：低位能级精细结构共振，外场中复合率增强，类氩 Sc^{3+} 强增宽共振.

类铍离子（Cu^{25+}，Sc^{17+}，Cl^{13+}）系统的研究对象：双激发 Rydberg 共振（meV 精度），外电磁场效应（Z 大时减小），自电离竞争；精细结构，多体效应，相对论效应，QED 效应.

（ⅲ）天体物理的重要数据：C^{3+} 的 DR 率，铁 L 壳双电子复合率，部分布居 L 壳的铁离子（$Fe^{17,18+}$，$Fe^{19,20,21,22,23+}$）和宇宙空间的光电离等离子体的数据.

（ⅳ）亚稳态离子激发态寿命的精密测量.

Ⅲ. TSR 上的分子离子物理

设备：在高电流注入器（HSI）和 TANDEN 加速器上产生分子离子束，在 TSR 中储存（至 1 分钟），平动和内部运动（振动）冷却与 TSR 中的电子束速度匹配至很低的相对能量.

研究对象：离解 - 复合动力学，二体与三体离解，电子诱导的振动冷却，库仑爆炸成像与分子的平衡几何构形，近阈光致离解，长程分子势等.

（ⅰ）离解 - 复合反应.

离解 - 复合反应过程如下：

分子离子 + 慢电子 $\xrightarrow{\text{反应}}$ 离解 - 复合（DR）⟶形成高激发态中性复杂分子⟶离解成中性产物.

反应的意义：研究低温电离介质（星际物质）与火焰中的重要过程，检验激发态分子的量子动力学理论.

DR 反应率及中性产物的性质对电子能量和分子离子的内部激发十分敏感，可在 TSR 上研究 HD^+ DR 截面的阈结构，H_3^+ 的离解复合中的碎片关联与产物激发：

$$H_3^+ + e \to \begin{bmatrix} H\,(1s) + H\,(1s) + H\,(1s) \\ H_2\,(\nu) + H\,(1s) \end{bmatrix},$$

以及 HeH^+，LiH^+ 的 Non-crossing Mode 的离解复合.

（ⅱ）电子引起的分子离子振动的冷却与加热：非弹性电子与分子离子碰

撞，致使电子与分子内部振、转自由度交换能量，从而形成不同的振、转激发态.

H_2^+，D_2^+ 与低能电子的超弹性碰撞导致振动冷却电子引起振动激发.

（ⅲ）TSR 上冷分子离子的库仑爆发成像：高速分子离子穿过薄箔，电子（对振、转运动而言）瞬间被剥离，几个核库仑爆发，测量碎片速度可得振、转运动的瞬间几何构形，从而研究：H_3^+ 的振动波函数；DCO^+，COD^+ 的 Bending Vibration 弛豫动力学；碎片电荷态对 HeH^+，LiH^+，CH^+ 的库仑爆发成像的影响；CH_2 的弯折能和弯折角（0.1eV，140°）.

（ⅳ）冷分子离子 CH^+ 和 OH^+ 的近阈光致离解.

CH^+ 和 OH^+ 中的分子长程势反映 C 和 O 原子中能级的精细结构分裂：

$$CH^+ \rightarrow C^+ + H, \qquad OH^+ \rightarrow O + H^+.$$

（ⅴ）玻色－爱因斯坦凝聚.

Ⅳ. 物理研究重点

（ⅰ）原子物理：研究低能或高能电子与比较复杂的类氦、类锂、类铍、类氩等原子离子的辐射复合反应和双电子复合反应，它们与宇宙等离子体物理和高温等离子体物理有关.

（ⅱ）分子物理：研究离解动力学（包括离解产物的关联与内部激发），电子与分子振、转自由度的耦合，分子几何构形和分子势，它们与结构化学和分子反应动力学有关.

Ⅴ. 实验设备的改进与利用

（ⅰ）TSR 新的、高分辨率的电子离子设备：①从砷化镓光阴极获得的冷电子束；②TSR 的冷电子靶的构建；③电子靶的探测系统.

（ⅱ）电子冷却研究：①用随机离子束加热的冷却力测量；②扩散电子冷却.

（ⅲ）TSR 上的激光谱学与激光冷却：①用快速锂离子的激光谱学检验相对论时间膨胀；②极端相空间密度的有效激光冷却；③宽带 UV 激光源的激光冷却；④TSR 采用作为高精度靶的用激光陷阱捕捉的中性原子.

（ⅳ）激光冷却与中性原子、分子的陷阱捕捉：①重力－光学表面陷阱中的超冷铯气体；②费米子锂的共振器偶极陷阱；③中性原子的准静电光学偶极陷阱；④超冷混合气体的相互作用与热力学；⑤超冷分子的光致离解谱学.

（ⅴ）重离子束医药治疗的发展：①锂离子辐射生物学；②正负电子偶负离子衰变率的新测量与高精度测量.

（ⅵ）实验设备改进的重点：①通过冷却技术提高电子束的品质；②发展电子冷却和激光冷却技术；③发展离子阱技术（如中性粒子阱技术）；④发展探测技术和谱学；⑤上述技术的应用.

【参考文献】

Annual Report of Max - Planck Institute for Nuclear Physics at Heidelberg. Germany，2001（6）：178 ~ 226

第 4 章　原子核物理学

4.1 引　言

原子核是物质的核心部分，它构成了宇宙已知总质量的 99.9%．原子核位于原子的中心，其体积为原子体积的 10^{-12}分之一，但具有极大的物质密度，是最重要的量子体系，也是展现量子力学规律最重要的客体和揭示强相互作用原理的天然实验室．

20 世纪里，原子核物理学在科学中占据着重要的地位，它的研究成果对社会发展做出了重大贡献，产生了重大影响；它的实验和理论方法促进了邻近学科与技术的进步．

粒子物理学的发展对核物理学有着强烈的影响，它使核物理学从研究核子（质子和中子）系统的动力学转变为研究由夸克组成的强子系统的动力学．核物理学是研究强子物质与原子核，以及它们的组成、性质和相互作用的科学．

核素图是在质子数和中子数（Z，N）的坐标平面上列出原子核基本性质的图表（见图 4－1)．在核素图上，自然界中稳定的或长寿命的原子核约有 300 种，稳定原子核的中子数与质子数之比约为：$N/Z\approx1.6$．偏离这一比例（即丰中子或丰质子）的很多原子核会变得不稳定，这些不稳定原子核形成的边界线叫做中子滴线和质子滴线（意思是在这条边界线外再加中子或质子就会滴下来)．在两条滴线之间可能存在的不稳定原子核约有 6000～8000 种，称为放射性核素，它们参与了天体演化和宇宙核素形成的过程，在地球上已经不复存在，但可以用人工的方法（在加速器上进行的核反应）产生．Z 大于 92 的核叫做超铀元素，Z 大于 100 的核叫做超重核，目前已合成 $Z=117$ 的超重核（我国已合成$^{259}Dy_{105}$)．核素岛中部的中等质量的原子核结合得较紧、较稳定；Z 大的原子核受库仑排斥力影响变得不稳定，倾向于往中等质量的原子核裂变；Z 小的原子核则倾向于熔合成中等质量的原子核，并释放出多余的能量．这就是核能利用的核裂变途径和核熔合途径．

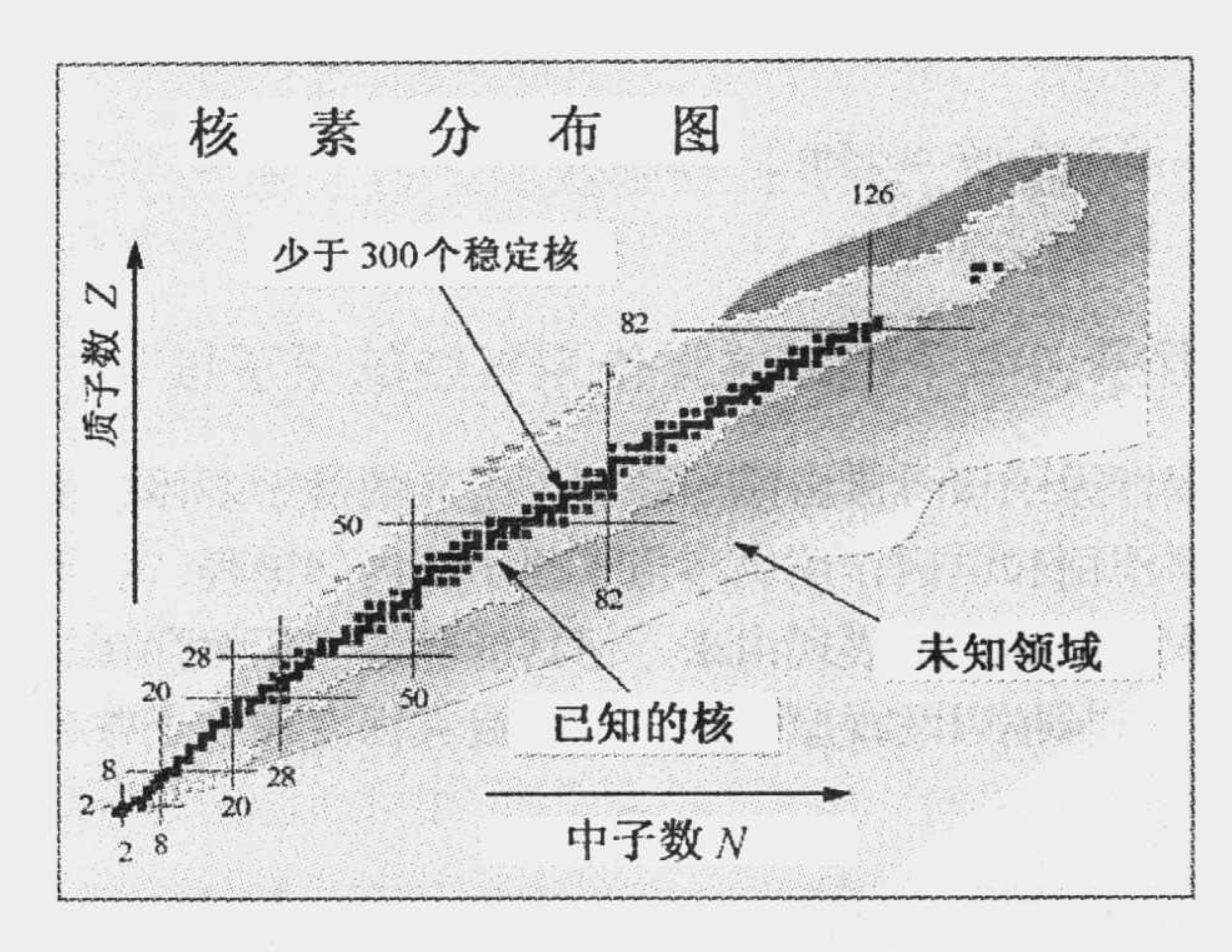


图 4－1　稳定核与放射性核素图

天体物理学的发展造成了它与粒子物理学和核物理学的交叉．宇宙演化早期的物质状态，元素的形成与演化，恒星的演化，中子星等致密天体的性质，中微子和暗物质等的探索，都需要粒子物理学、核物理学和天体物理学的共同努力，天体核物理这一交叉学科便应运而生．

当前，核物理基础研究有两个前沿：

(1) 基于放射性束流装置的远离 β 稳定线原子核的研究．这些人造的 6000 ~ 8000 种不稳定的原子核具有不同于稳定核的结构、反应和衰变特性，对它们的研究不仅会促进核理论的发展，而且还有难于估量的应用前景．

(2) 基于 QCD 的核物理．粒子物理与核物理的交叉，使核物理学的研究深入到夸克的层次，把原子核物理学从核子（质子、中子）动力学（QND）推进到夸克－胶子动力学（QCD）．基于 QCD 的核物理是核物理研究的另一个前沿．

在核物理应用方面，核武器与核能的利用仍然是当今社会关注的热点．核武器小型化、发射的机动性、反拦截和精确击中目标，是世界上各核大国追求的目标．核能利用的近期目标是发展清洁的、可再生的裂变反应堆（如加速器驱动的反应堆），长远目标则是使核聚变反应堆能投入工业运行．与上述核武器与核能的利用有关的核物理应用基础研究正在加紧进行．

4.2 低能原子核物理学：结构与反应、裂变与衰变问题

4.2.1 作为质子、中子组成的强作用系统的原子核

低能核物理把原子核看成由质子和中子组成的量子多体系统，强相互作用起支配作用，弱作用和电磁作用也参与了原子核内的过程. 由于能量低，夸克和胶子的自由度不能明显地表现出来，但其低能效应仍然存在，常常以介子的形式表现出来. 卢瑟福因发现原子核，卡特威克因发现中子曾分别获得诺贝尔物理学奖.

4.2.2 低能核物理学有结构、反应与衰变三方面的问题

4.2.2.1 *原子核结构*

原子核有三类运动：平均场支配下的独立粒子运动（即原子核的壳层结构），与原子核变形有关的集体运动（振动和转动），以及核子关联产生的集团运动（核子对关联、α 集团等）. 新运动模式还在不断被发现（如各种形式的巨共振，新集体运动模式，量子无规或量子混沌运动等）. Mayer Jensen 因发展原子核壳层模型，Bohr、Mottelson 和 Rainwater 因发展原子核的集体运动模型曾分别获得诺贝尔物理学奖；Arima 因发展原子核集体运动的互作用玻色子模型（IBM）而获得美国最高物理学奖.

4.2.2.2 *原子核反应*

已知的原子核反应类型有势场散射，少数核子参加的直接反应，较多核子参加的中间过程反应，几乎所有核子都参加的复合核反应，以及重离子核反应. 核反应研究的趋势是使反应条件精细可控制，反应截面的测量更精确、更细致，提供尽可能详细、准确、实用的数据，特别是快中子裂变、熔合反应以及天体核过程的关键数据. Bethe 因发现太阳燃烧的核反应链而获得诺贝尔物理学奖.

4.2.2.3 *原子核裂变*

原子核裂变主要是开展对核武器与核能利用（如与清洁能源有关的诱发裂

变）的研究．Hahn 因发现核裂变而获得诺贝尔物理学奖．

4.2.2.4　原子核衰变

除常规的 α，β，γ 衰变外，人们又发现了新的核衰变模式，如发射重核（碳 C、氖 Ne、镁 Mg、硅 Si）的衰变，双质子衰变，质子或中子延发衰变等．贝克莱因发现原子核的放射性，居里因其对放射性原子核的研究而分别获得诺贝尔奖．

20 世纪传统的低能核物理有着辉煌的历史，它对科学与人类做出了杰出的贡献．

4.3　放射性核与超重核

4.3.1　核物理在广度和深度两方面面临着巨大变革

4.3.1.1　对 21 世纪核物理发展前景的两种观点

目前人们对 21 世纪原子核物理学的发展前景有两种看法，一种是悲观的看法，另一种是乐观的看法．持悲观看法的人认为，50 年来核物理学发展缓慢，21 世纪的核物理学不会有大的发现，核物理学家也不会有大的作为．而持乐观看法的人认为，核物理学长期的量的积累孕育着新的质的飞跃，核物理学在广度和深度两方面都将面临着巨大的变革．

4.3.1.2　广度和深度方面的挑战与机遇

（1）在广度方面面临的变革与机遇．重离子装置与放射性束流装置提供了人造的极端条件，使核物理学的研究从对自然核的研究发展到对人造核的研究．放射性束流核物理学是世界性的科研前沿，也是我国科研的重点；6000～8000 种人造的新核素使核物理学的研究领域扩大了 20 倍．

（2）在深度方面面临的变革与机遇．介子探针与轻子探针装置把原子核深层次的夸克和胶子自由度显现出来，使原子核物理学的研究从量子核子动力学（QND）经量子强子动力学（QHD）达到量子色动力学（QCD）所描述的夸克和胶子层次．基于 QCD 的核物理学是另一个研究前沿，它是全新的、充满机遇的领域．把 QCD 在强子物理学中的应用和 QED 在原子分子和凝聚态物理学

中的应用做一类比，可以看出：20 世纪 QED 在原子、分子、凝聚态物理学中的应用导致许多重大发现与诺贝尔奖；21 世纪 QCD 在核子、强子、原子核物理学中的应用也将导致许多重大发现与诺贝尔奖.

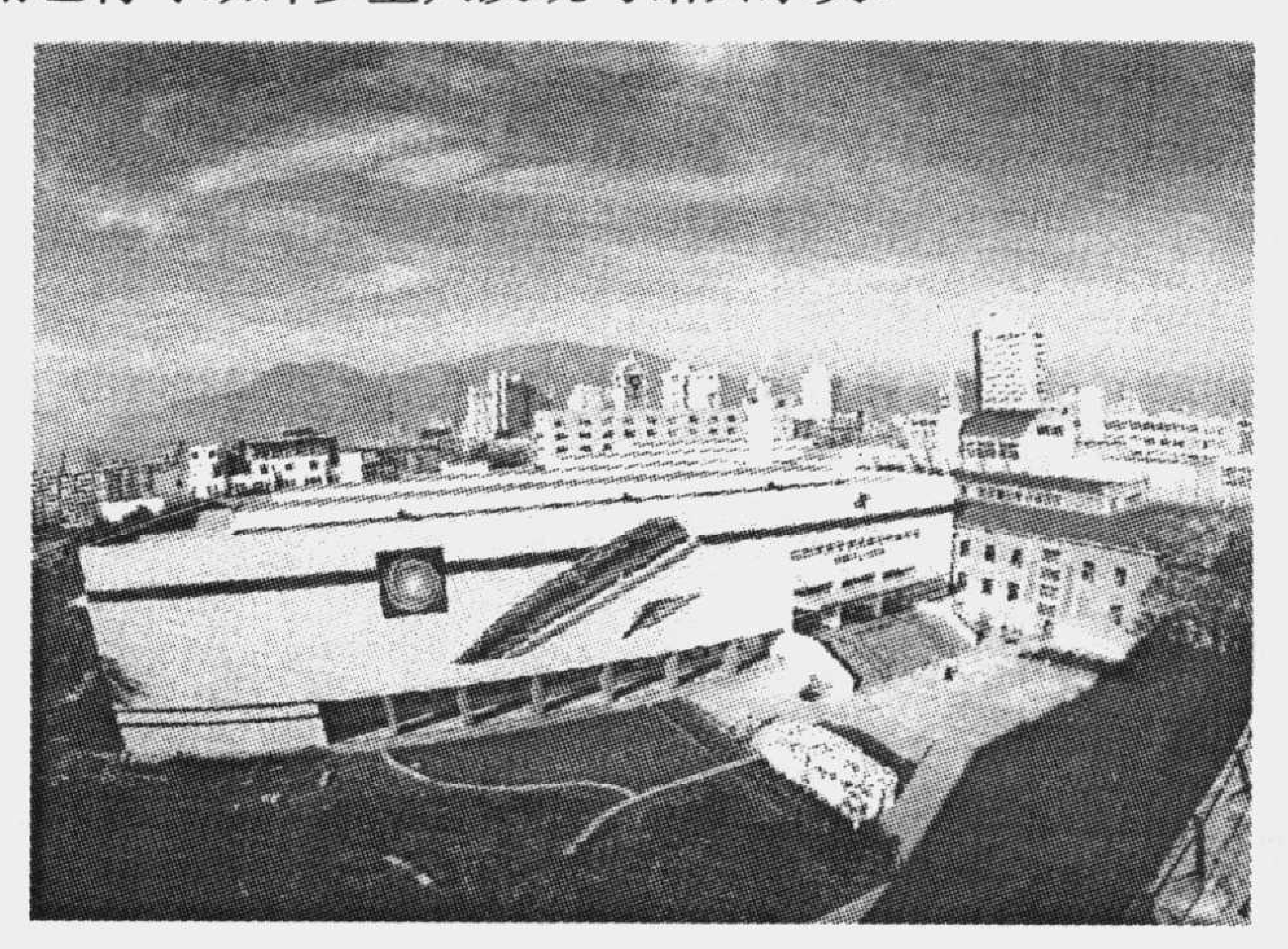


图 4-2　我国位于兰州的重离子加速器国家实验室正建造具有国际先进水平的放射性核束流装置——冷却储存环 CSR

4.3.2　放射性束流核物理开创的新天地

4.3.2.1　人造极端条件下的核物理研究

（1）极端高自旋条件下的研究：原子核能承受的角动量 J 有多大？与此相关的原子核所能承受的形变有多大？研究惯性力（离心力、科氏力）与核力竞争下的核现象，按照等效原理研究引力与核力的竞争.

（2）极端高温高密度条件下的研究：原子核所能承受的核温度 T 有多大？研究动能与势能竞争下的核现象；研究原子核的液-汽相变.

（3）极端同位旋条件下的研究：远离 β 稳定线的原子核 $|N-Z|$ 有多大？中子和质子滴线在哪里？库仑力与核力竞争下的核现象；已发现原子核的新形态：中子晕与质子晕；超重核的（A，Z）有多大？超重岛是否存在？原子核结合的本质是什么？

4.3.2.2　远离核与超重核的实验研究

（1）远离核：2005 年，全世界将有 10 台放射性束流加速器投入使用，以

开展远离核研究.

远离核的发现：

- 中子晕核：$^{6}He_{2}$（2），$^{11}Li_{3}$（2），$^{11}Be_{4}$（1），$^{14}Be_{4}$（2），$^{17}Be_{4}$，$^{17,18,19}B_{5}$（2），$^{17,19,22}C_{6}$（1，2），$^{22}N_{7}$（1），$^{23}O_{8}$（1），$^{26,28}O_{8}$，$^{24,26,29}F_{9}$（1，2），$^{29}Ne_{10}$（1）
- 质子晕核：$^{8}B_{5}$（1），$^{9}C_{6}$（1），$^{12}N_{7}$（1），$^{26\sim28}P_{15}$（1），$^{23}Al_{13}$

绝大多数远离核参与了星球元素的合成过程.

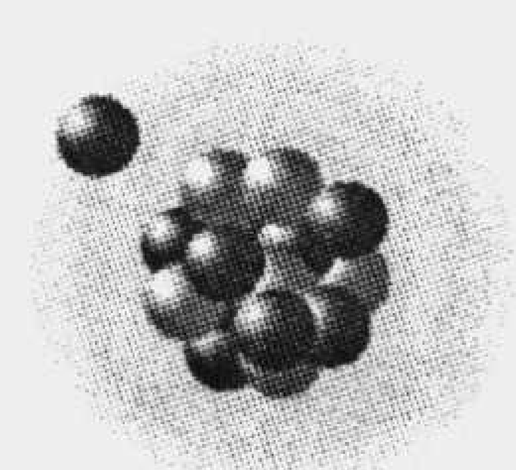
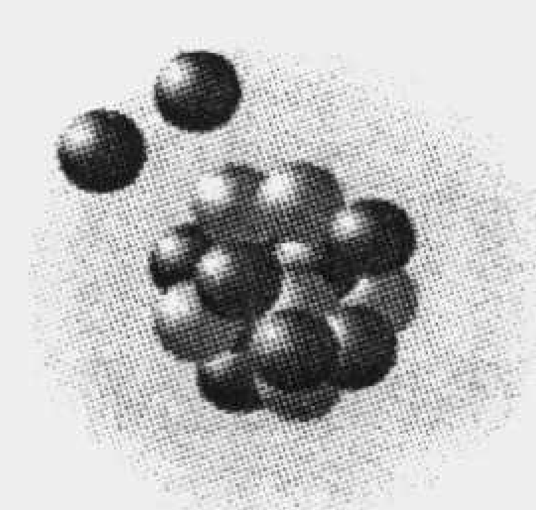
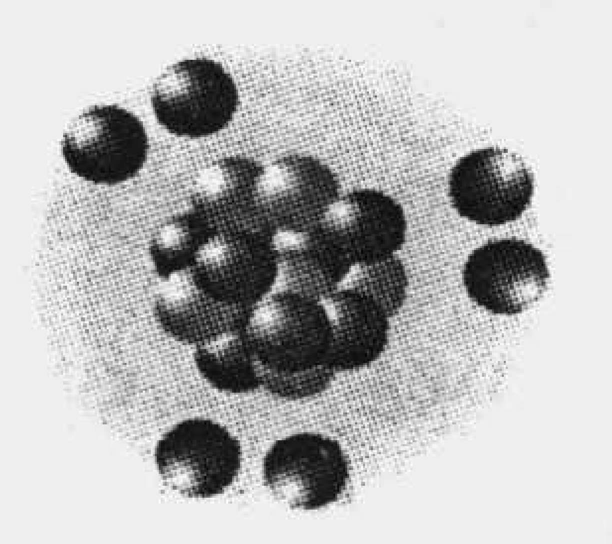




图 4－3　中子晕核示意图

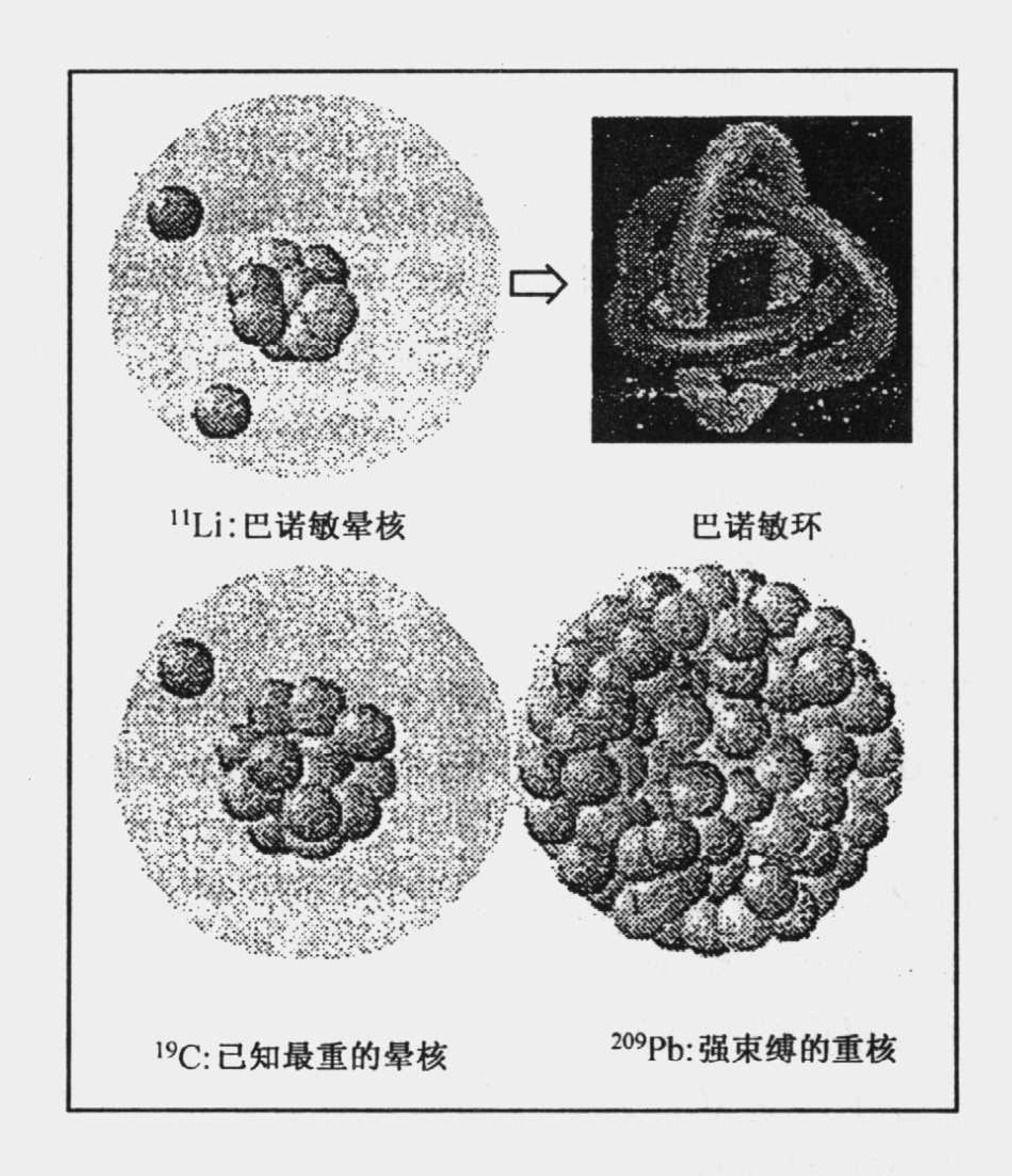


图 4－4　中子晕核^{11}Li 和^{19}C 的大小与运动示意图

远离核结构中存在中子（质子）皮、中子（质子）晕、核子对、核子集团．目前正在研究远离核的结构中还有什么？小滴纯中子（质子）物质是否存在？滴线在哪里？平均场理论正确吗？远离核的衰变中有新类型、新机制．远离核参加的核反应也有新类型、新机制．

(2) 超重核：目前正在研究的超重核结构中的超重岛在哪里？（$Z=114$? 118? 126?）超重核是准分子结构，还是复合系统结构？超重核的主要衰变形式是什么？除 α，n，f 以外，还有什么形式？用什么反应机制产生超重核？是否可以采用冷熔合？

4.3.2.3　远离核与超重核的理论研究

基于平均场和剩余相互作用的传统理论需要更新，如发展多中心平均场理论，集团结构理论和离散谱－连续谱耦合理论．

(1) 远离核．

下面分述远离核研究领域面临的问题．

结构：壳层结构问题，解释老壳的消失和新壳的产生．

产生壳层结构的因素包括平均场，泡利原理，自旋－轨道（l－s）耦合力(成对力?)，等等．面临的问题是：目前用于描述中子质子皮、晕的平均场理论是否够用？是否需要双中心、三中心平均场理论？如何发展原子核的弱结合态、连续谱、正能结合态（共振态）的核结构理论？剩余相互作用在结构稳定性中的作用是什么？需要发展基于相对论平均场理论（RMF）的组态混合壳模型吗？如何描述核内的集团结构？当集体运动成为集团的相对运动时，如何超越玻尔、莫特逊（B－M）模型，对其进行描述？

反应：光学模型，直接反应，中间过程反应，复合核反应等传统理论是否够用？如何描述集团转移与重组，以及这些不同反应道的强耦合？

衰变：如何描述集团重组与散裂，以及不同衰变道的强耦合？

(2) 超重核．

世界上已合成 $Z=111,112,113,\cdots,117$ 的原子核，中国合成了 $^{259}Dy_{105}$．

下面分述超重核研究领域面临的问题．

结构：如何预言超重岛？液滴模型＋壳修正行吗？Z 在哪里结束？超重核是什么结构？是准分子还是复合系统？如何研究其结构？相对论平均场理论(RMF）可以吗？超重核结构面临的是剩余作用与组态混合，正能结合态的稳定性，能量在各自由度和在动能－势能之间的分配等一系列问题，特别是正能

结合态和正能非结合态的耦合与竞争问题，位垒穿透问题等.

衰变：衰变形式除 α，f，n，p 等外，还有哪些？是否存在准分子散裂？位垒与位垒穿透如何描述（衰变模式与合成途径密切相关）？

关键问题：对弱耦合或正能结合态系统，剩余作用、组态混合、能量分配与势能化对结构稳定性起着十分重要的作用. 因此，对于远离核和超重核，必须考虑剩余作用、组态混合、正能态连续谱才能作出正确的描述. 基于 RMF 的组态混合壳模型或集团结构模型也许比多中心平均场理论更加简洁有效. 在 RMF 中，介子场能更好地描述核内的介质效应（介子场的质量重整化效应和储能效应）.

4.4　中高能原子核物理学

中高能原子核物理学研究核内介子、夸克自由度，以及基于 QCD 的核物理与夸克 - 胶子等离子体（QGP）.

4.4.1　核内介子、超子自由度

（1）核内介子：当入射核子能量 $E_p = 1\text{GeV/A}$ 时，可产生 π，K 介子. 已在核内发现了 π 介子的电磁流，核中 π 凝聚，以及核中 Δ_{33}激发.

（2）核内超子：把超子植入核内可形成超核. 利用介子工厂产生的 K 介子等介子束，已发现的超核有：

80 种 Λ 超核：$\Lambda^3\text{H} \rightarrow \Lambda^{209}\text{Bi}$；

两种双 Λ 超核：$2\Lambda^6\text{He}$，$2\Lambda^{10}\text{Be}$；

Σ超核：$\Sigma^9\text{Be}$，$\Sigma^{12}\text{B}$；

粲超核：$\Lambda\text{C}^9\text{Be}$.

4.4.2　核内夸克与 QGP

（1）核内夸克：通过电子对核的深度非弹性散射实验发现了核内的夸克分布和 EMC 效应，其分布对氘核和对铁不同，暗示核内核子变胖，束缚夸克的袋子变大.

（2）QGP：夸克束缚在核子和介子之内就像装在袋子内，在高温、高密度条件下，核内的这些核子袋子彼此交叠，使得夸克解除一个核子或介子对它的禁闭可以在核内较大的范围内运动，形成夸克 - 胶子等离子体（QGP），这是

宇宙早期的状态，其产生条件为：

$\rho > 5\rho_0$，$T = 150\text{MeV} \sim 200\text{MeV}$，$\varepsilon \geqslant 2\text{GeV/cm}^3 \sim 3\text{GeV/cm}^3$.

产生后的信号表现为 J/ψ 产额压低，奇异粒子产额反常等.

4.4.3 基于 QCD 的核物理深入到夸克层次

4.4.3.1 强子物理

强子物理的研究对象包括：核子的结构，如质量、自旋、磁矩；介子的结构，如质量、自旋、磁矩，衰变分支比；强子的结构，如质量、自旋、磁矩，衰变分支比；多夸克强子，如五夸克和四夸克强子等（应包括夸克海和胶子的贡献）.

4.4.3.2 基于夸克的核物理

基于夸克的核物理应从 QCD 出发研究轻核（如氘，氚，氦等）的结构与性质，重核的结构与性质.

4.4.3.3 基于 QCD 的核物理研究的困难

QCD 在核物理中的应用是空前复杂的量子多体问题，类似于 QED 在原子、分子和凝聚态物理中的应用. 基本困难有：

(1) QCD 真空与强子耦合而且可变. 晶体能带论告诉我们，从实验中可确定电子的晶体背景结构，那么能否从实验上确定夸克的背景 QCD 为真空? QCD 真空是否为 Instanton 真空.

(2) QCD 多体问题：包括真空中粒子对的产生、湮灭，粒子数随能量变化而变化，价夸克与真空虚夸克对和胶子的耦合.

(3) 强耦合非微扰非线性问题：目前还缺乏有效的理论方法.

4.4.3.4 等效理论与中间形态理论的必要性

固体理论的经验教训：求解 QED 多体问题的困难，使固体物理成为 Heisenberg，Anderson，Hubbard，BCS 等有效理论活跃的舞台. 那么，求解 QCD 多体问题的困难，同样将使核物理成为 QCD 各种等效理论活跃的舞台. 等效理论的特点是：

(1) 它是包含部分有效动力学自由度的理论.

(2) 它是包含 QCD 的部分相关信息的理论. ①QHD 的命运: 按 QCD 改造, 作为 QCD 等效理论而存在并发挥作用. 其有效自由度为: 介子与重子自由度是作为夸克 - 胶子复合自由度而出现的. ②QND 的命运: 按 QCD 改造, 作为 QCD 等效理论而存在并发挥作用. 其有效自由度为: 核子自由度是作为奇数个夸克的复合自由度而出现的. ③QND、QHD 与 QCD 的关系: QHD 是 QCD 在介子与重子有效自由度子空间的低能等效理论. QND 是 QCD 在核子有效自由度子空间的低能等效理论. 这些子空间是通过 QCD 动力学对称性理论约化的, 并保持所期望的 QCD 的部分对称性信息.

4.4.4 发展基于 QCD 的核物理的有利条件

核物理学的宝贵遗产是发展基于 QCD 的核物理的良好起点.

4.4.4.1 平均场理论

化多体问题为单体问题, 即独立粒子运动. 平均场的变化导致集体运动, 即独立粒子的相干运动.

成功例子: 原子物理的平均场理论——原子的壳层结构, 原子核物理的平均场理论——原子核的壳层结构, 凝聚态物理的平均场理论——固体的能带结构.

4.4.4.2 有效自由度理论

冻结核实自由度, 只处理价粒子自由度. 把全部自由度问题简化为部分自由度问题. 原子物理、原子核物理、固体能带论的研究都采用此方法, 并已取得实效.

4.4.4.3 多体关联理论

多体系统结构的等级性与层次性把整体结构分解为各种类型的子结构, 逐次逼近求解. 核物理与固体物理成功地运用了关联和结构的等级理论: 先处理平均场导致的独立粒子运动, 再处理平均场以外的两体关联或独立粒子对运动、独立准粒子运动 (BCS 理论)、集团运动等.

4.4.4.4 动力学对称性理论

QCD 的按能量划分的动力学对称性把整个 QCD 的希伯特空间约化为由确定的守恒律和相应的量子数确定的子空间, 从而自动保留了 QCD 的部分对称

性信息.

成功例子：粒子物理中的 SU（3）夸克模型；核物理中的 Elliot - SU（3）模型、IBM - SU（6）模型的三个群链；原子分子物理中的 Morse 势与 SU（2）模型；量子光学中的 N 能级 J - C 模型、SU（N）模型；固体物理中的 SO（5）- SU（4）模型.（?）

4.4.4.5 能量标度原理

自然界能量的量子特性：不同运动模式有各自特有的活动能区和休眠（冻结）能区. 应发展各能区的有效自由度理论，特别是低能区的有效自由度理论：在活跃的相关自由度所张的子空间内的、约化的 QCD 的等效理论，通过对质量和耦合常数的重整化来包括其余自由度的影响.

4.4.4.6 对“万有理论”的理解

万有理论应当包含各种等效理论，并通过等效理论来解释实验中最基本的微观理论.

4.5 天体核物理学——宇宙元素的合成及其丰度

与天体环境下的核过程有关的对核结构、核反应和核衰变的研究，包括以下几个方面的内容.

4.5.1 从大爆炸到宇宙原初核合成：终止于氦

宇宙大爆炸开始后，从强子化到氢、氘、氚、氦元素的产生的基本过程如下：

10^{-35}s 以内：四种力大统一时期；

10^{-32}s：开始强子化；

10^{-12}s：弱力与电磁力分离；

10^{2}s ~ 10^{3}s：元素原初合成（氢、氘、氚、氦）. 氦的丰度为 25%.

4.5.2 太阳等恒星的核反应燃烧与平稳的核合成

质量为 $0.1M_{\odot} \sim 60M_{\odot}$的恒星的核反应过程：氢是太阳等恒星燃烧的原初燃料，氢燃烧后合成氦，氦燃烧后合成碳、氧等轻元素，终止于铁元素（$A < 60$）.

恒星寿命主要由氢的燃烧阶段决定，与恒星质量有关．研究恒星内核燃烧和轻元素合成的反应链，需要有关这些核的结构、反应和衰变的知识．

4.5.3 超新星爆发与爆发式核合成

质量超过 8 倍太阳质量的恒星，核燃烧终止后，由于引力塌缩将发生超新星爆炸，诱发爆发式核合成．其主要过程有：快质子俘获过程（rp 过程，$A\approx 100$）、快中子俘获过程（r 过程）、慢中子俘获过程（s 过程，与 β 衰变联合，合成重核）．上述原子核多数临近滴线区，绝大多数不稳定，需研究它们的结构、反应和衰变，以获得精确的信息．

4.5.4 化学元素的形成、演化与丰度

要理解化学元素的形成、演化与丰度，必须求解在天体条件下，上述核反应与核衰变链的方程组，此时需要输入天体环境的数据，如温度、密度、化学组成，以及核物理数据，如所有相关核的结构和衰变与反应的数据．

目前还缺乏远离核，特别是天体核物理的关键核的数据．

【参考文献】

1 P. Black，G. Drake，L. Jossem 著，赵凯华等译．物理 2000：进入新千年的物理学．北京：北京大学出版社，2000

2 〔美〕原子核物理学专门小组．90 年代物理学：原子核物理学．北京：科学出版社，1994

3 徐躬耦，杨亚天．原子核理论：核结构与核衰变部分．北京：高等教育出版社，1987

4 徐躬耦，王顺金．原子核理论：核反应部分．北京：高等教育出版社，1992

5 黄卓然著，张卫宁译．高能重离子碰撞导论．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2002

6 王顺金．21 世纪核物理发展前沿探讨．原子核物理评论．2000，17(1)：19～21

第5章　基本粒子物理学与量子场论

5.1　基本粒子物理学的现状与成就

基本粒子物理学是研究时间、空间和物质的基本属性，即物质的基本组元和它们的基本相互作用的科学．基本粒子物理学追求物质世界及其运动规律的统一性．基本粒子是极小的微观世界，需要借助具有极高能量的粒子探针才能获得精确的信息．因此，又把基本粒子物理学称为高能物理学．

20世纪，基本粒子物理学的进展使人们对物理学基本定律的认识达到了新的水平，我们把这种新认识称为基本粒子物理学的标准模型．

研究基本粒子的主要实验手段是高能加速器（辅之以宇宙线）．现在世界上著名的高能加速器和宇宙线观测站有：

美国布鲁克海文国家实验室（BNL）的AGS（30GeV）和RHIC；

美国费米实验室（Fermi Lab）的Tevatron（100GeV）：2TeV，$p-\bar{p}$对碰；

美国斯坦福大学的直线加速器（SLAC）：100GeV，e－e对碰；

美国得克萨斯州的超级超导回旋加速器（SSC）：20TeV（计划已取消）；

西欧核子研究中心（CERN）的大型强子对碰机（LHC）；

北京正负电子对碰机（BEPC）：5.6GeV，e－e对碰；

中国羊八井宇宙线观测站：主要观测γ暴（10^{15}eV～10^{16}eV，膝区）．

5.1.1　基本粒子物理学的重大发现

20世纪后半叶，基本粒子物理学的研究有重大进展，这些进展导致基本粒子标准模型的建立．20世纪50年代以后，基本粒子物理学重要的实验发现和理论进展见表5－1所示．从表中可见，基本粒子及其相互作用的基本对称性的实验发现和理论进展是贯穿近50年来粒子物理学大发展的主线，而李政道和杨振宁关于宇称不守恒的发现正是这一主线的开端．

表 5-1　基本粒子物理学主要的实验发现和理论进展

发现年代	发现内容
1956	李政道和杨振宁发现宇称不守恒
1964	发现宇称和电荷共轭联合不守恒
1967	温伯格和萨拉姆提出弱电统一理论，引进真空对称性自发破缺和黑格斯粒子才能使电子和中间玻色子获得质量．为理解对称性破缺的本质以及确认黑格斯粒子是否存在，西欧核子研究中心建造了大型强子对碰机（LHC）
1974	丁肇中和里克特发现粲夸克（c）
1983	发现带电和中性中间玻色子 $W_{\mu}^{\pm}$，Z_{μ}^{0}
1995	发现顶夸克（t）
1997	发现底夸克（b）

5.1.2　组成物质的基本粒子

基本粒子是在我们当前的实验条件和认识水平下发现的组成万物的最小单元．按照基本粒子标准模型，基本粒子可分为两大类：①参与引力作用、电磁作用和弱作用的轻子；②参与引力作用、电磁作用、弱作用和强作用的夸克．轻子和夸克又分三代，每一代之间都有很好的代对称性．三代轻子与三代夸克的名称和质量列于表 5-2，它们的内禀量子数列于表 5-3．

表 5-2　三代基本粒子夸克和轻子的对称性

	第一代		第二代		第三代	
	粒子	质量(m_p)	粒子	质量(m_p)	粒子	质量(m_p)
轻子	电子 e 中微子 ν_e	0.00054 $<10^{-8}$	μ 介子 μ 中微子 ν_{μ}	0.11 <0.0003	τ 介子 τ 中微子 ν_{τ}	1.9 <0.033
夸克	上夸克 u 下夸克 d	0.0047 0.0074	粲夸克 c 奇异夸克 s	1.6 0.16	顶夸克 t 底夸克 b	189 5.2

表 5-2 中基本粒子的质量是以质子质量为单位的．由表可见，三代轻子和三代夸克之间存在巨大的质量差异，而中微子的质量还没有完全确定下来．

表 5-3　基本粒子的内禀对称性和相应的量子数

	粒子	同位旋 I	I_3	超荷 Y	电荷 Q	重子数 B 轻子数 l	奇数 s	自旋宇称 J^π
夸克	$(\frac{1}{2})^+$	u	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0
	d	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$(\frac{1}{2})^+$
	s	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	$(\frac{1}{2})^+$
	c	0	0	$\frac{4}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$(\frac{1}{2})^+$
	t	0	0	$\frac{4}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$(\frac{1}{2})^+$
	b	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$(\frac{1}{2})^+$
轻子	e	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	-1	1	0	$\frac{1}{2}$
	ν_e	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	0	1	0	$\frac{1}{2}$
	μ	0	0	-2	-1	1	-1	$\frac{1}{2}$
	ν_μ	0	0	0	0	1	0	$\frac{1}{2}$
	τ	0	0	-2	-1	1	0	$\frac{1}{2}$
	ν_τ	0	0	0	0	1	0	$\frac{1}{2}$

表 5-3 中，基本粒子有 6 种味，构成 SU（6）对称性，其中味的 SU（3）子对称性最为重要；同位旋及其第三分量 I 和 I_3、奇异数 s，以及超荷 Y，来自 SU（3）味对称性；电荷 Q、重子数 B 和轻子数 l 分别来自与电荷守恒、重子数守恒和轻子数守恒对应的三个不同的 U（1）对称性；自旋宇称 J^π 可能来自粒子内禀空间的某种转动和反射对称性．因为色对称性仅为强相互作用所特有，而且物理粒子是无色的，因此，没有专门引进色量子数．反粒子是用负的轻子数或负的重子数去区分，没有专门引进正反粒子量子数和相应的对称群．

基本粒子的电荷、同位旋第三分量和超荷之间满足有名的 Gell - Mann - Nishijima 公式：$Q=I_3+\frac{Y}{2}$．基本粒子及其反粒子的数目为：

$$夸克数+反夸克数=18+18=36 种．$$

轻子数 + 反轻子数 = 6 + 6 = 12 种.

共 48 种基本粒子.

5.1.3　基本粒子的相互作用

现已发现的基本粒子的相互作用有 4 种，按照标准模型，所有基本粒子的相互作用都是通过规范场来传播的. 传播基本相互作用的规范场粒子叫做媒介子或中间玻色子，也有 4 类，分别介绍如下：

(1) 强相互作用. 这是夸克之间的相互作用，通过 8 种具有复色的胶子来传播. 这 8 种具有复色的胶子构成颜色 SU (3) 规范场，是短程的最强相互作用，统治着原子核和强子世界，并通过强子物质在天体现象中起作用.

(2) 电磁相互作用. 这是带电轻子和夸克之间的相互作用，通过一种光子来传播. 这种光子构成 U (1) 规范场，是次强的长程相互作用，在微观世界、宏观世界和天体世界中都起作用.

(3) 弱相互作用. 这是轻子和夸克之间的相互作用，通过三种中间玻色子来传播，是力程最短、强度很弱的相互作用. 这种相互作用统治着基本粒子、强子和原子核的衰变过程，并通过轻子、强子和原子核衰变在天体现象中起作用.

(4) 引力相互作用. 这是轻子、夸克、规范场粒子和所有物质之间都普遍存在的相互作用. 它是长程的、强度最弱的相互作用，在微观世界中的作用可以忽略，但统治着天体世界.

上述 4 种基本相互作用的名称、规范群、力程、强度和起作用的范围见表 5 - 4，传递这些相互作用的规范场量子的名称、质量、电荷和自旋见表 5 - 5.

表 5 - 4　四种基本相互作用的名称、规范群、力程、强度和起作用的范围

类　型	强　度	力　程	规范群	作用范围
引力相互作用	10^{-39}	长	GL (4)	天体、宇宙
电磁相互作用	$\frac{1}{137}$	长	U (1)	微观、宏观
弱相互作用	10^{-13}	极短(10^{-16}cm)	SU (2)	微观
强相互作用	1	短 (10^{-13}cm)	SU (3)	微观

表 5-5　传递四种基本相互作用的规范场量子的名称、质量、电荷和自旋

相互作用类型	介子名称	电　荷	自　旋	质量 (GeV/c^2)
引力作用	引力子 $G_{\mu\nu}$	0	2	0
电磁作用	光子 A_μ	0	1	0
弱作用	中间玻色子 $W_\mu^\pm$，Z_μ^0	±e，0	1	83，93
强作用	胶子 A_μ^a	0	1	0

传递四种基本相互作用的规范场量子的种类数为：

光子种类+中间玻色子种类+胶子种类+引力子种类

$=1+3+8+1=13$，

即共 13 种媒介子.

轻子无色，不参与强相互作用；夸克有红、黄、蓝三色，是强相互作用的色荷.

常见强子的夸克结构举例：

重子：质子、中子等重子.

$P=(uud), N=(udd), \Lambda^0=(uds), N^{++}=(uuu)(J=\frac{3}{2}), \Omega^-=(sss)$.

介子：粲粒子，π 介子，K 介子.

$J/\psi=(c\bar{c}), \pi^+=(u\bar{d}), \pi^-=(\bar{u}d), K^+=(u\bar{s}), K^-=(\bar{u}s)$.

5.1.4　基本粒子物理学和量子场论的内容

现代粒子物理学和量子场论的基本内容包含在基本粒子的标准模型及其应用中，现分别简介于下.

5.1.4.1　基本粒子的标准模型

基本粒子的标准模型由以下三种理论组成.

(1) 量子电动力学 (QED)：这是关于带电轻子和夸克与电磁 U (1) 规范场相互作用的量子理论，其中最主要的部分是电子与电磁场相互作用的量子理论. 它属于阿贝尔规范场的量子理论.

(2) 量子弱电统一理论 (QWED)：这是量子电动力学 (QED) 的推广，把电磁作用与弱作用统一起来，建立弱电统一的 U (1) ×S (2) 的规范理论. 它属于非阿贝尔规范场的量子理论.

(3) 量子色动力学 (QCD): 这是关于夸克与胶子的 SU (3) 规范场相互作用的强相互作用的量子理论. 它属于更复杂的非阿贝尔规范场的量子理论.

把上述三种相互作用的规范场理论统一起来的规范场理论叫做大统一理论 (Grand Unification Theory, GUT). 目前这种理论还没有最后定型, 但多数人倾向于 SU (5) 大统一理论, 因为它最简明、最具有代表性, 可重整化.

5.1.4.2 标准模型的应用

除了量子电动力学和弱电统一理论传统而广泛的应用外, 目前标准模型的应用主要集中在强子物理方面, 其中包括以下研究:

(1) 介子的结构与衰变, 如 J/ψ 物理、B 介子物理;

(2) 重子的结构与衰变, 如核子的结构、重子的结构, 最近的 5 夸克重子态 (Penta - guark);

(3) 强子和轻子参与的碰撞和反应.

5.1.4.3 基于 QCD 的低能等效理论和格规范理论

标准模型在应用中发展出各种有效的理论计算方法. 量子电动力学和弱电统一理论相互作用的特征强度不大, 因而发展了十分有效, 而且非常精密的微扰理论, 已获得成功的应用, 并与实验结果惊人地一致. 但是对于电磁作用的强束缚态问题, 仍然缺乏束缚态非微扰的量子电动力学场论. 对于量子色动力学, 在高能渐进自由区, 已发展出十分有效的高能微扰理论, 并在与实验的联合研究中取得很大成功. 但在中低能区, 特别是对于强作用束缚态问题, 由于作用强度大, 微扰理论失效, 需要发展 QCD 的非微扰量子场论方法. 遗憾的是, 这方面的进展不大. 在这种情况下, 出现了各种基于 QCD 的低能等效理论和近似理论, 包括: 各种夸克袋模型, 如 MIT 和 SUNY 袋模型; 夸克手征模型; QCD 的低能等效场论, 如整体色模型 (GCM); 光锥 QCD (LCQCD); 哈密顿形式的非微扰理论; 以及基于对称性和流代数的求和规则.

在时空离散化格点上对 QCD 直接近似求解, 发展了格规范理论 (LGT), 但由于计算量太大, 目前只达到有限的精度, 所计算的物理量范围也受到一定的限制.

5.1.5 基本粒子标准模型的成就

基本粒子标准模型之所以成为目前人类认识微观物质世界所达到的最高境

界，是因为它对微观世界描述的正确性和精度达到了令人吃惊的程度，其中最突出的是量子电动力学和弱电统一理论．量子色动力学虽然还不能与之相比，但正稳步向这一目标发展．下面列举了标准模型的各种理论在描述实验结果时达到的精度．

（1）QED：精度达 10^{-8}，如电子反常磁矩，兰姆位移等．

（2）QWED：精度达 10^{-6}．

（3）QCD：在高能区，由于渐进自由，微扰论的描述精度很高；在中低能区，格点规范数据、等效理论的描述精度尚不高．

5.2　基本粒子标准模型的基本问题

基本粒子标准模型的基本问题涉及粒子物理学的进一步发展和物理学的变革，这些问题的正确提出和正确表述是困难的，因为它涉及对基本粒子现有理论的最深层次的认识和对现有理论与实验之间关系的深刻理解．下面根据粒子物理学界多数学者的观点和笔者个人的看法与偏好，提出若干问题予以简述，仅供读者研究参考．

5.2.1　对称性自发破缺的本质与机制

标量场真空对称性自发破缺：$\langle\varphi\rangle\neq 0$ 的本质与机制．

通过赫格斯机制给轻子（e，μ）和中间玻色子（W，Z）以质量，其物理本质如何?

对称性自发破缺使强力、电磁和弱力产生巨大的差别，其机制与本质如何? CP 破坏的本质与机制是什么?

5.2.2　基本粒子质量的起源与本质

与上一个问题密切相关的问题是基本粒子质量的起源与本质．

用赫格斯机制解释质量的起源对吗?

轻子的质量差为什么如此大?

什么是质量?

5.2.3　赫格斯粒子存在的问题

赫格斯粒子的质量上限 M_H 是否小于 1TeV?

为什么一直没有发现赫格斯粒子？是因为赫格斯粒子太重？还是赫格斯机制不对，或者赫格斯粒子根本就不存在？

5.2.4　夸克禁闭的本质与机制

夸克是绝对禁闭的还是相对禁闭的？

夸克禁闭的本质与机制是什么？

5.2.5　夸克和轻子的三代及其对称性的本质

夸克和轻子只有三代吗？为什么只有三代？

为什么出现三代的对称性？其本质是什么？

5.2.6　基本粒子的种类和理论参数的数目

基本粒子有 61 种：基本粒子种类 + 基本媒介子种类 = 48 + 13 = 61.

理论参数共有 19 个，包括质量参数 12 个：3（轻子）+ 6（夸克）+ 2（媒介子）+ 1（黑格斯粒子）= 12；耦合强度参数 3 个：2 + 1 = 3，其他参数如混合角等共 4 个.

目前的基本粒子（在 10^{17}cm 上仍是类点粒子）是基本的吗？

还有新的基本粒子吗？是否有亚夸克粒子？

5.2.7　大统一理论问题

大统一能量标尺是否为 $E_{GUT} \geqslant 10^{15}$GeV = 10^{24}eV?

有几种大统一方案，如 SU（5），SO（10），E_6，E_8，通过赫格斯机制破缺到标准模型：SU（3）$\otimes$SU（2）$\otimes$U（1）.

SU（5）大统一理论最简明、最具有代表性，可重整化.

质子衰变没有发现，理论预言为 $\tau_p \approx 10^{31}$ 年（计算值），而实验确定 $\tau_p \gg 10^{32}$年！

大统一可能吗？

5.2.8　引力量子化

引力相互作用是规范场吗？

引力量子化需要吗？可能吗？

引力可能统一吗？

如何实现引力量子化?
如何统一量子引力?

5.2.9 发散问题

发散问题是与基本粒子结构的时空扩展性有关，还是与真空量子涨落的属性有关?

发散与点结构（定域性理论）相联系，扩展结构不发散.

发散与真空涨落的属性相联系：白噪声发散，有色噪声不发散.

基本粒子的时空结构与真空量子涨落的属性相关，它们可能是同一事物的两个方面.

5.2.10 规范对称性的本质

规范对称性的起源和物理本质是什么?

规范对称性是真空背景的某种属性吗? 是它的某种局域对称性吗?

规范对称性为什么能决定基本相互作用?

5.2.11 真空的本质

真空是物理背景吗? 它有哪些基本属性?

真空背景的微观、宏观和宇观属性，特别是微观和宇观属性是什么?

真空背景如何影响基本粒子和宇宙的结构?

5.2.12 时空的本性

什么是时空? 时空是真空背景的几何结构吗?

与真空背景的微观、宏观和宇观结构相对应，什么是时空的微观、宏观和宇观几何结构，特别是时空的微观和宇观几何结构?

时空与物质的微观、宏观和宇观运动的联系是怎样的?

宏观时空与微观时空的属性有何不同?

量子时空的含义是什么?

5.3 引力的统一与超弦

基本粒子物理学的崇高目标是实现引力量子化和统一量子引力. 许多物理

学家认为，实现这一目标的最有希望的理论途径是超弦．超弦理论的发展经历了漫长的岁月，现简述如下．

5.3.1 弦理论的历史

（1）Dirac 弦（20 世纪 50 年代初提出）：把光子看作弦，正负电子 e^-，e^+ 是弦的两端，长度 $L_\gamma = 10^{-15}$cm.

（2）Veneziano 弦（20 世纪 70 年代初提出）：把强子（介子，重子）看作弦，夸克是弦的端点，长度 $L_h = 10^{-13}$cm．QCD 出现后，不再需要弦．

（3）早期的弦理论（QCD 出现后提出）：把轻子和夸克看作弦，为了理论的自洽，理论且能包含 g，$W^\pm$，Z^0，γ 和引力子（$J = 2$），要求时空维数为 $D = 26$，弦的长度为：

$$L_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-33}\text{cm}, \qquad \frac{L_p}{L_{\text{proton}}} = 10^{-20} \approx \frac{L_{\text{atom}}}{L_{\text{sun}}}.$$

早期弦理论的特点为：①无发散；②包含引力子（$J = 2$）；③$D = 26$.

早期弦理论面临的问题有：①出现快子（$V > c$）；②出现反常；③多余维度（卷缩）．

5.3.2 超弦理论的需要

No－Go 定理（Coleman－Mandula，1967）：不可能用下列对称群建立包含引力的大统一理论：

$$G = \text{Poincare Group} \otimes \text{内部对称群}.$$

克服上述困难的途径之一是在弦理论中引进超对称性，使弦理论变成超弦理论．这时 No－Go 定理不再成立．

5.3.3 超 弦

（1）超空间与超对称性：玻色子坐标＋费米子坐标＝超坐标．超坐标构成超空间．超空间出现的超对称性导致超对称规范理论．

（2）超弦理论是具有超对称性的弦理论（见图 5－1）．

超弦理论的超对称群是 SO（32）或 $E_8 \times E_8$.

人们倾向于认同 $E_8 \times E_8$，即一个 E_8 描述现有基本粒子所有内部对称性，另一个 E_8 描述影子物质．

超弦理论的特点是：①无快子；②不发散；③消除反常；④$D = 10$；⑤有

5 种超弦理论，其间有对偶性：Ⅰ型，杂化 O，杂化 E，ⅡA 型，ⅡB 型（自对偶）.

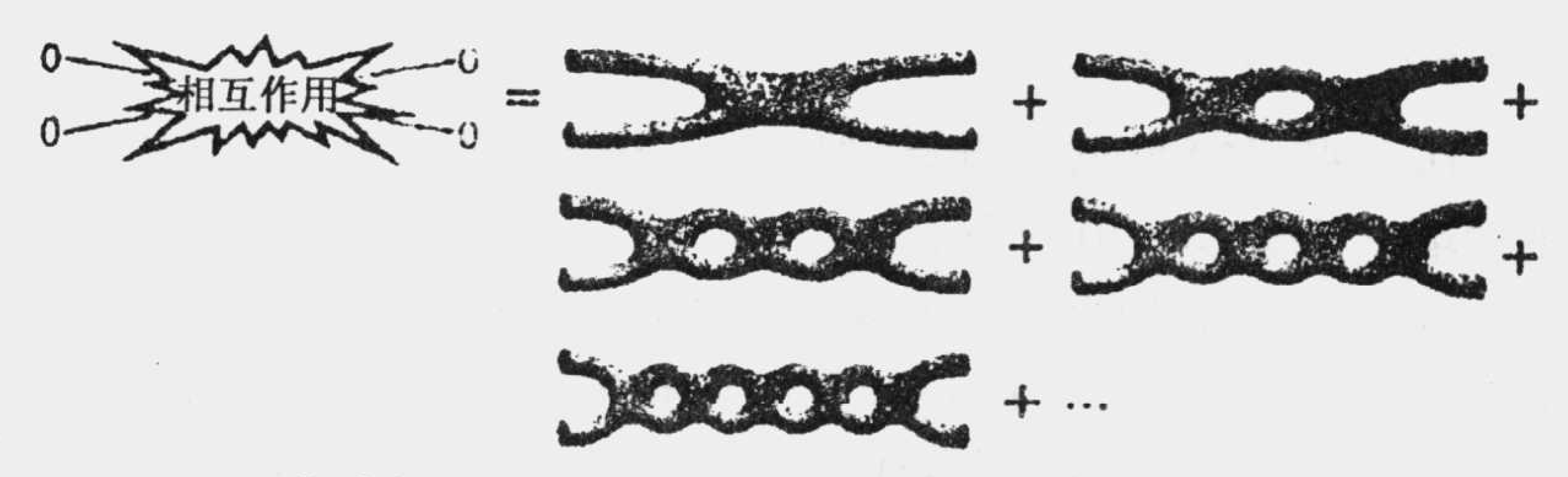


图 5－1　两条弦相互作用示意图

5.3.4　M 理论

M 理论有多种含义，如：Mystery（神秘理论），Mother（母理论），Membrane（膜理论），Matrix（矩阵理论）.

M 理论的特点是：①$D=11$；②形成对偶网，统一了 5 种弦理论和 11 维超引力理论（见图 5－2）. ③导致一种新的数学产生.

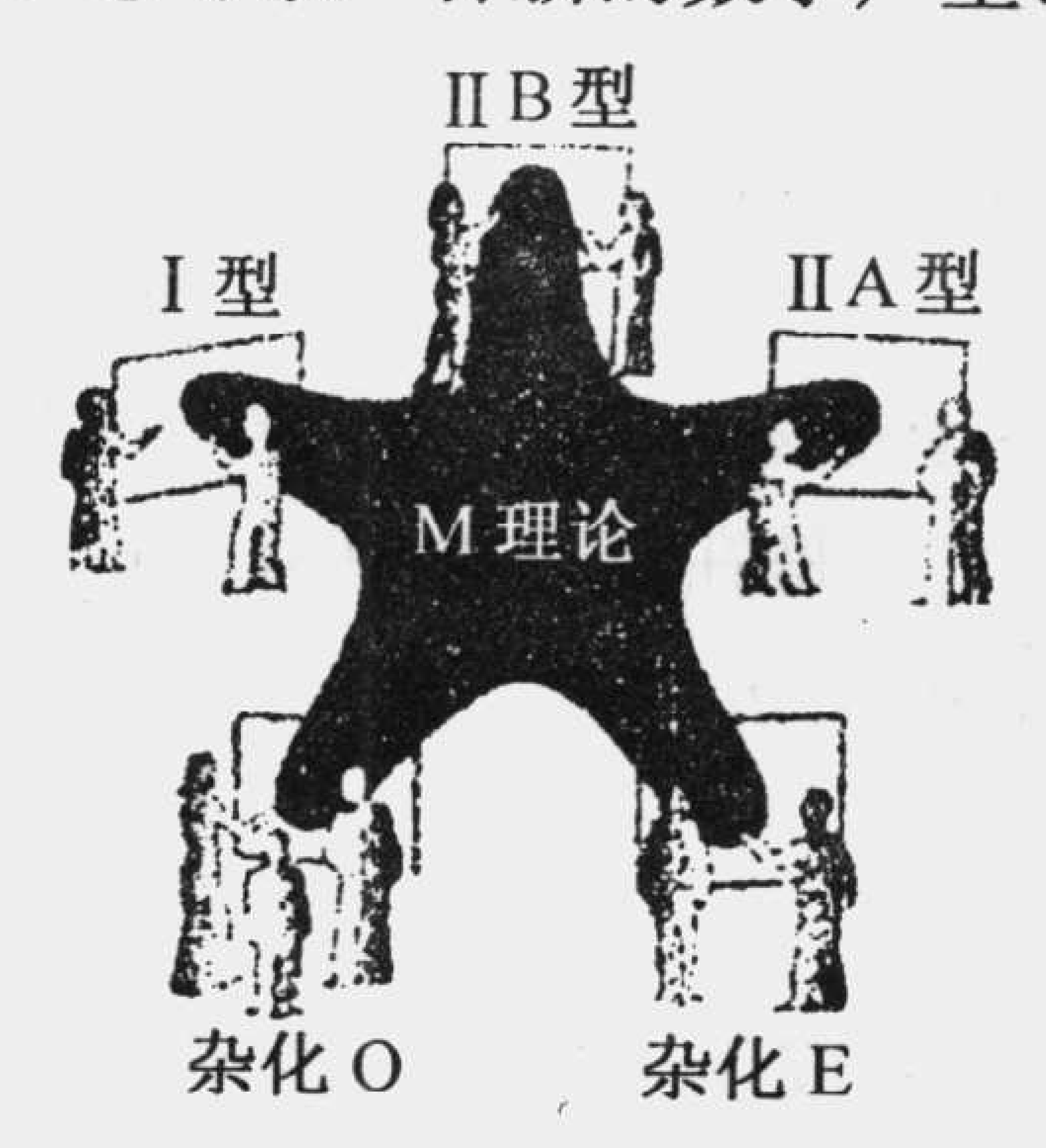


图 5－2　M 理论中各种弦理论的关系

5.3.5　超弦理论面临的问题

超弦理论面临的问题有：①超对称伴随粒子未被发现；②引力子和磁单极未被发现；③赫格斯粒子未被发现；④5 种超弦理论不唯一；⑤如有亚夸克存

在，则超弦理论会有本质变化；⑥多余维度的卷缩（多余维是 $D=6$ 的 Calabi - Yao 的复的定向紧流形），欧拉数与夸克 - 轻子代数有关，对三种作用常数有影响.

5.4　粒子物理学与核物理学的交叉

粒子物理学与核物理学的交叉和关联表现在以下几个方面.

(1) 粒子物理促进了核物理向纵深发展：出现了基于 QCD 的核物理，为核物理从夸克层次上研究原子核提供了理论基础.

(2) 核物理为粒子物理提供了检验标准模型的实验室：宇称不守恒的验证在 ^{60}Co 上完成；夸克胶子等离子体（QGP）需要通过超高能重原子核碰撞来产生；EMC 效应是在高能电子对原子核的深度非弹性散射中发现的.

(3) 粒子物理的标准模型在强子物理和核物理中的应用，已成为粒子物理学家和核物理学家共同的事业.

5.5　粒子物理学与天体物理学和宇宙学的关联

粒子物理学与天体物理学和宇宙学的关联表现在下列几个方面：

(1) 基本粒子物理学和宇宙早期演化有着密切的联系，基本粒子物理学为大爆炸宇宙的早期演化过程的描述提供了理论基础.

(2) 宇宙线提供了目前加速器不能产生的超高能（10^{15}eV ~ 10^{20}eV）粒子，人们希望从宇宙线中找到反物质和磁单极.

(3) 暗物质与暗能量是宇宙学和粒子物理学共同研究的课题，只有两门学科共同努力才能解决，而这将促使粒子物理学、天体物理学和宇宙学的研究工作产生革命性的突破.

【参考文献】

1 P. Black, G. Drake, L. Jossem 著，赵凯华等译. 物理 2000：进入新千年的物理学. 北京：北京大学出版社，2000

2 丁一宾. 统一之路：90 年代理论物理前沿课题. 长沙：湖南科学技术

出版社，1997
3 〔美〕基本粒子物理学专门小组．90 年代物理学：基本粒子物理学．北京：科学出版社，1992
4 杨振宁．基本粒子及其相互作用．长沙：湖南教育出版社，1999
5 〔美〕B·格林．宇宙的琴弦．长沙：湖南科学技术出版社，2002
6 戴元本．相互作用的规范理论．北京：科学出版社，1987
7 李政道．粒子物理和场论简引（上、下册）．北京：科学出版社，1984
8 斯蒂芬·霍金．万有理论：宇宙的起源与归宿．海口：海南出版社，三环出版社，2003

第 6 章　广义相对论、天体物理学与宇宙学

6.1　宇宙的层次结构

像微观和宏观物质世界具有层次结构一样，由各种天体组成的宇宙也具有尺度分明的层次结构，在这些层次结构的背后隐藏着深刻的物理学规律和天体宇宙学规律.

6.1.1　天体的层次结构

天体具有行星、恒星、星际云、星团、星系以及宇宙等一系列的层次结构，现将这些不同层次结构的天体学特征量列于表 6-1.

表 6-1　天体的层次结构及其天体学特征量

天体的层次结构	行星	恒星	星际云	星团	星系	宇宙
半径（pc）	10^{-10}	10^{-8}	10	10	10^4	10^{10}
平均距离（pc）	10^{-5}	1	10	10^3	10^6	…
质量（$M_\odot$）	10^{-6}	1	10^3	10^6	10^{11}	10^{21}
平均密度（$kg\cdot m^{-3}$）	10^3	10^3	10^{-20}	10^{-18}	10^{-20}	10^{-27}
中心温度（K）	10^4	10^7	10^2	…	…	…

注：1 秒差距（1pc）＝3.261633 ly＝3.085678×10^{14}m（ly＝light year，即光年）

天体物理学研究的目的是利用已知的物理学定律对各个层次的天体作出统一的描述.

由行星围绕的恒星系统是组成宇宙的最小细胞．像地球一样，绝大多数行星是某一恒星系统的成员，它们的演化密切依赖于所属的恒星．因此，天体物理学的研究从恒星开始，而把对行星的研究特殊化为对地球物理学和太阳系行星的研究，因为对于天体物理学来说，目前只有太阳系的行星可供比较仔细地研究.

6.1.2　太阳与恒星

与我们的关系最为密切，我们对其认识最多，最感亲切的恒星是太阳.

6.1.2.1　太阳系

作为典型的恒星系统的太阳系，我们对它的认识最为详细，积累的数据最多，也最准确. 这些基本数据列于表 6－2.

表 6－2　太阳系的基本数据

太阳的质量 ($M_\odot$)	密度 ($\rho_\odot$)	半径 ($R_\odot$)	年龄	亮度 ($L_\odot$)	组成	普遍磁场 (B)	中心温度 T_c	表面有效温度 T_e
1.99×10^{10} kg = 99% 太阳系的质量	1.410×10^{3} kg/m^3	6.959×10^{8}m	50 亿年，还可燃烧 50 亿年	3.90×10^{26}W	大气的化学组成是氢、氦、氧、碳、氮、氖、硅、镁、铁等.	$\approx10^{-4}$T	1.5×10^{7}K	5800K

太阳的能量来源：两种核反应把氢聚变为氦①.

太阳系的成员：太阳系包含九大行星，2000 多颗小行星，60 多颗卫星，

---

① (1) 质子－质子反应
$2\times$： $e^- + H^1 + H^1 \longrightarrow D^2 + \nu + 1.44$MeV
$2\times$： $D^2 + H^1 \longrightarrow {}_2He^3 + \gamma + 5.49$MeV
${}_2He^3 + {}_2He^3 \longrightarrow {}_2He^4 + H^1 + H^1 + 12.85$MeV
每个质子提供 6MeV 能量.
(2) 碳循环：CN 和 CNO 循环
(i) $T\leqslant10^7$K 时为 CN 循环. 4 个 H 合成一个氦，碳和氮是中介，中微子带走 6%的能量.
${}_1H^1 + {}_6C^{12} \longrightarrow {}_7N^{13} + \gamma$　　1.94MeV
${}_7N^{13} \longrightarrow {}_6C^{13} + \beta^+ + \nu$　　1.51 (0.71) MeV
${}_1H^1 + {}_6C^{13} \longrightarrow {}_7N^{14} + \gamma$　　7.55MeV
${}_1H^1 + {}_7N^{14} \longrightarrow {}_8O^{15} + \gamma$　　7.29MeV
${}_8O^{15} \longrightarrow {}_7N^{15} + \beta^+ + \nu$　　1.76 (1.00) MeV
${}_1H^1 + {}_7N^{15} \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4$　　4.96MeV
总共 25.01 (1.71) MeV
(ii) $T\geqslant1.7\times10^7$K 时为 CNO 循环，6 个氢合成一个氦，并把碳变成氮.
${}_1H^1 + {}_7N^{15} \longrightarrow {}_8O^{16} + \gamma$　　12.13MeV
${}_1H^1 + {}_8O^{16} \longrightarrow {}_9Fe^{17} + \gamma$　　0.60MeV
${}_9Fe^{17} \longrightarrow {}_8O^{17} + \beta^+ + \nu$　　0.80 (0.94) MeV
$\beta^+ + \beta^- \longrightarrow \gamma$　　1.02MeV
${}_1H^1 + {}_8O^{17} \longrightarrow {}_7N^{14} + {}_2He^4$　　1.19MeV

以及无数的彗星、流星和固体微粒. 行星椭圆轨道几乎在同一平面，偏心率很小（0.01～0.09）. 木星质量最大，为太阳质量的千分之一.

太阳物理学和粒子物理学的一个长期之迷是太阳中微子的丢失，即太阳的来自下述反应的中微子的丢失：

$$ {}_5B^8 \longrightarrow {}_4Be^8 + e^+ + \nu \ (14.06\text{MeV}). $$

太阳标准模型对上述反应预言的中微子流为：

7.9±2.6SNU（$1\text{SNU} = 10^{-36}$中微子吸收/秒/靶原子）.

实验值为：2.1±0.3SNU.

这一丢失由中微子振荡引起. 中微子振荡已由别的实验所证实，这表明几种中微子可以相互转化，而且中微子有静止质量：$m_{\nu_e} < 2\text{eV}$.

天体物理学把地球公转长半径作为天文单位 AU：$1\text{AU} = 1.495985 \times 10^{11}\text{m}$.

1AU 长度在 1pc（1 秒差距）距离所张的角为 1s（秒）.

6.1.2.2　恒星与恒星团

恒星的数据范围见表 6－3.

表 6－3　恒星的数据范围

质量（$M_\odot$）	半径（$R_\odot$）	光度（$L_\odot$）	大气化学组成
$M = 0.08 \sim 100$	$R = 10^{-3} \sim 10^3$	$L = 10^{-4} \sim 10^6$	与太阳接近

变星：指亮度、光谱、磁场等物理特性发生周期性、半周期性或不规则变化的星体. 其中脉动变星包括射电变星和 X 射线变星.

爆发变星：包括灾变变星（超新星）、激变变星（新星）和耀星.

星团：是由引力束缚在一起的成团的恒星系统，包括疏散星团和球状星团.

疏散星团：包含上千个恒星，位于银盘，含较多重金属；已发现一千多个.

球状星团：包含上百万个恒星，位于银晕，贫金属，年老；已发现 130 多个，其中有案可查的有 2000 多颗变星.

星协：由光谱大致相同，物理性质相近的几十至几百颗恒星组成，位于银河系旋臂上，是不稳定系统，也是恒星的发源地.

赫罗图：是恒星在温度－亮度平面上的分布图，用于研究恒星的演化. 大部分恒星所处的位置叫主星序，恒星一生中的大部分时间处于主星序上.

恒星的演化与归宿可按质量分类，见表 6－4.

表 6-4　恒星的演化与归宿

质量（$M_\odot$）	最终阶段	主要现象
0.08 以下	氢白矮星	氢未燃烧
0.08~0.5	氦白矮星	氦未燃烧
0.5~1.0	碳白矮星	碳未燃烧
1.0~3.0	碳白矮星	巨红星，损失质量
3~8	爆发	碳爆发燃烧型超新星
8~30（?）	中子星	铁核心，超新星爆发
30~100	黑洞	引力塌缩为黑洞

恒星演化的路径如下：

星际气体 $\xrightarrow{\text{冷却和引力不稳}}$ 原始星⟶主星序（热核反应：H 和 He 燃烧）

⟶巨红星（中等质量元素合成，中微子产生，物质平稳抛射）

⟶ { 重恒星⟶中子星；超重恒星⟶黑洞；轻恒星⟶白矮星（重元素物质抛射）

恒星在主星序上停留时间最长；恒星的质量越大，寿命越短.

超新星（Super Nova）：质量 $M=8\sim30M_\odot$的恒星在演化终了时会发生超新星爆发，这是最激烈的天体物理现象，是大质量恒星走向死亡前的“回光返照”.

到 1999 年初，人类共发现超新星 1445 颗，平均每年发现 100 颗.

银河系 50~100 年出现一次超新星爆发.

SN1987A 超新星爆发为我们提供了极为丰富的信息，包括中微子流的信息.

中国是历史上最先发现超新星的国家. 早在宋代（1054 年）就有关于超新星的记载（至少有四项）：“至和元年五月己丑客星出天关之东南可数步，岁余消没.”（《续资治通鉴长篇》）SN1987A 超新星爆发后转化为蟹状星云中的中子星.

超新星特性如下：光球半径为 10^{11}m，温度为 10^5K ~ 10^6K，释放能量 10^{44}J ~ 10^{48}J，爆发时间为几秒. 超新星爆发时发射宇宙线，高速推出电离气体壳层（10^4 km/s），其中含有很多重元素（如铁、钴、镍、钙、硅、硫、镁等）.

超新星最后转化为中子星.

根据有无氢和谱线特征，可将超新星分为：SNIa（无氢）、SNIb（无氢）、

SNII - L（有氢）、SNII - P（有氢）.

6.1.3　致密天体

致密天体是指密度特别大的天体，这样的天体表面引力特别强.

天文学研究的致密天体有白矮星、中子和黑洞，它们的天体学特征量列于表 6 - 5.

表 6 - 5　致密天体的特征量

天体名称	质量（M）	半径（R）	平均密度（10^3 kg/m^3）	表面引力
白矮星	$\leqslant M_\odot$	$10^{-2}R_\odot$	$\leqslant 10^7$	$\approx 10^{-4}$
中子星	$(1\sim3)\ M_\odot$	$10^{-5}R_\odot$（$\approx$7km）	$\leqslant 10^{15}$	$\approx 10^{-1}$
黑　洞	任意值	$2GM/c^2$	$\approx M/R^3$	≈ 1

白矮星靠简并电子气的量子压强抵抗引力塌缩，中子星靠简并中子的量子压强抵抗引力塌缩.

中子星是以脉冲星的形式被发现的. 脉冲星是发射周期性电磁脉冲的天体. 电磁脉冲的周期范围是 $P = 1\text{ms} \sim 4.308\text{s}$，其周期总是变慢，即 $\dot{P} > 0$.

中子星在银河系的银河面上聚集度较高. 到 1999 年，人类已发现中子星 733 颗，其中周期不大于 10ms 的有 50 颗，球状星团内有 32 颗，射电脉冲双星有 50 颗，发射高能 X 射线或 γ 射线的脉冲星 10 颗. 还发现发射 X 射线和 γ 射线的脉冲星 Gemiga 和有大质量伴星的脉冲星.

脉冲星的年龄：$\tau = \dfrac{P}{2\dot{P}}$. 从 P 和 $\dot{P}$ 的观测值推知，我国 1054 年记载的蟹状星云中产生的脉冲星（中子星）年龄为 945 年（1054 + 945 = 1999）.

脉冲星的表面磁场约为 10^8T.

6.1.4　星际物质

星际物质是恒星之间的物质，包括星际气体、星际尘埃、星际磁场，以及各种星云和宇宙线. 银河系的星际物质约为 $10^9 M_\odot$，占银河系质量的 5%，平均密度为 10^{-21}kg/m^3（密度范围为 10^{-9}kg/m^3 ~ 10^{-22}kg/m^3），高度集中在银道面，特别是旋臂中. 星际物质中包括有机分子和无机分子. 其主要成分如下：

气体：氢占 60%，氦占 30%，其他重元素的丰度类似于太阳气体；密度为 $0.025 M_\odot/\text{pc}^3$；

尘埃或微粒的密度：0.002$M_\odot$/pc^3；

宇宙线密度：5×10^5eV/m^3；

磁场强度：$H\approx10^{-10}$T；

磁场密度：2×10^5eV/m^3；

星光的密度：5×10^5eV/m^3.

6.1.5 银河系与河外星系

6.1.5.1 星　系

星系是由几十亿至几千亿（$10^9\sim10^{11}$）颗恒星和星际物质构成的，空间范围从几千光年到几十万光年的天体系统．银河系就是我们居住的星系，银河系以外的星系叫做河外星系．星系和星系团是宇宙的主要组成成员，它们的性质为认识宇宙的起源和演化提供了重要信息．

根据形状和结构的不同，可将星系分为：漩涡星系、椭圆星系、不规则星系．类星体是活动星系的一种．星系的物理特征量见表 6-6.

表 6-6　星系的物理特征量

物理特征	椭圆星系	漩涡星系	不规则星系
质量（$M_\odot$）	$10^6\sim10^{13}$	$10^9\sim10^{11}$	$10^8\sim10^{10}$
直径（kpc）	1～150	6～15	2～9
光度（$L_\odot$）	$10^6\sim10^{11}$	$10^9\sim10^{10}$	$10^7\sim2\times10^9$
恒星成分	老年恒星	老年恒星和青年恒星	老年恒星和青年恒星
星际物质	少量气体	气体和尘埃	多少不定，有的没有

6.1.5.2 银河系

银河系是我们居住的星系——宇宙岛，它是类似透镜的系统，其基本参数如表 6-7 所示.

表 6－7　银河系的基本参数

对　象	参　数
银盘直径	50kpc
银盘厚度	1kpc～2kpc
光学光度	3×10^{36}W
核球	长轴 4kpc～5kpc，厚度 4kpc，质量 $4\times10^{9}M_{\odot}$
银晕直径	100kpc
太阳至银心距离	(8.5 ± 1.0) kpc
太阳在银盘上的高度	8pc
太阳周围恒星密度	$0.05M_{\odot}/pc^{3}$
太阳处银河自转速度	200km/s
太阳绕银河一周的时间（宇宙年）	2.46×10^{8}a
银河系质量	$10^{12}M_{\odot}$
气体质量	$8\times10^{9}M_{\odot}$
恒星总数（颗）	1.2×10^{11}
银河系年龄	10^{10}a

6.1.5.3　河外星系

我们可观测的宇宙约有 10^{12}个星系，多数比银河系小，少数比银河系大得多.

距离银河系最近的小星系是麦哲伦星云（大、小麦哲伦星云分别距银河系 49kpc 和 58kpc），较大的星系是仙女座星云（距银河系 236 万光年）.

星系按形状可分为椭圆星系、漩涡星系和不规则星系（仅占 3%）；按大小又可分为超巨星系（占少数）和矮星系（占多数）；按天体活动的快慢还可分为正常星系、活动星系和活动星系核.

活动星系占星系总数的百分之几，可分为有活动核的活动星系和其他活动星系．其特点是要爆发，有相对论粒子抛射、喷流和亮条．星系都有红移，这表明星系在彼此远离，宇宙在膨胀.





图 6-1　银河系示意图





图 6－2　银河系（地球广角）



图 6－3　银河系（空间广角）



图 6－4　仙女座星云



图 6－5　蟹状星云



图 6－6　蟹状星云中的动态变化：(1) 左图——地面观测到的蟹状星云的整体，它是 900 年前超新星爆炸的碎片．这个直径为 10 光年的星云位于距金牛座 7000 光年远的地方．集结在星云边缘的绿色、黄色和红色的细线是爆炸后扩散到太空中的碎片．(2) 右图——蟹状星云内部图，图中心附近有一对星，左侧的是一颗脉冲星

6.1.5.4　星系群

星系群由十几个到几十个星系组成.

6.1.5.5　星系团

星系团由几百个到几千个星系组成，平均直径为几个 Mpc.

6.1.6　宇　宙

我们观测所及的全部天体的集合称为观测宇宙.

宇宙学研究宇宙的整体结构、大尺度结构、半径、宇宙的演化（过去，现在，未来）、宇宙的年龄，以及支配宇宙的物理定律. 宇宙的尺度为 150 亿光年，宇宙的年龄为 150 亿年. 宇宙的物质和运动分布是均匀的和各向同性的. 宇宙物质中最多的是氢，其次是氦（25%）. 宇宙在加速膨胀.

宇宙具有层次结构，可分为星系团和超星系团.

星系团：由十几个至几千个星系靠引力积聚在一起，形成星系团.

人类目前已发现上万个星系团，它们相互距离近百亿光年. 规则星系团呈球形，不规则星系团无一定形状.

超星系团：由若干个星系团聚集在一起形成的更大的天体系统.

超星系团的质量为 $10^{15}M_\odot \sim 10^{17}M_\odot$. 宇宙中存在大量不发光的暗物质（占 30%）. 宇宙在加速膨胀表明宇宙中存在暗能量（占 66%）. 宇宙中可见物质仅占 4%.

6.2　黑洞与类星体

黑洞与类星体是宇宙中最神秘的天体，对它们的认识和理解是对物理学和宇宙学的最大挑战.

6.2.1　黑　洞

黑洞（Black Hole）是广义相对论的预言. 当原初天体的质量足够大，任何已知的基本粒子的简并量子压强都不能抗拒引力的塌缩效应时，引力塌缩将继续下去，把物质分布压缩成一个质量点. 对于球对称质量分布，史瓦兹发现，在史瓦兹半径

$$r_g = \frac{2MG}{c^2} = 2.96\left(\frac{M}{M_\odot}\right)\text{km}$$

以内，所有物质（包括光子）都不可能摆脱引力的控制而逃逸出去，因此，史瓦兹半径界定的球面，代表黑洞的视界．从黑洞视界发出的波长为 λ 的光子离开黑洞无限远时的波长为 λ_∞，它将产生极大的波长红移量 $\Delta\lambda$：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_\infty - \lambda}{\lambda} = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{-1/2} - 1 \longrightarrow \infty \quad (r \longrightarrow r_g).$$

黑洞的特征量只有三个，即质量、角动量和电荷．

像宏观热力学一样，黑洞热力学也有四大定律．

第一定律：黑洞服从动量－能量守恒．

第二定律：黑洞的质量和表面积不会减少．对史瓦兹黑洞，

$$A = 4\pi r_g^2 = \frac{16\pi G^2 M^2}{c^4}.$$

黑洞只能吞噬质量而不能抛出物质，表明它的质量 M 和表面积 A 不会减少．

第三定律：不可能通过有限物理过程使黑洞表面引力 K 为零，因为不可能通过有限物理过程使黑洞的质量 M 变成无穷大．

$$K = \frac{GM}{r_g^2} = \frac{c^4}{4GM}.$$

K（黑洞表面引力加速度）与黑洞温度成正比．

第零定律：黑洞视界面上（对史瓦兹黑洞为史瓦兹球表面）温度处处相等．

霍金证明，由于量子涨落，黑洞表面会蒸发粒子而损失质量．

量子涨落可能会阻止黑洞塌缩到普朗克长度 L_p 以内，即

$$L_p = \left(\frac{G\hbar}{c^3}\right)^{1/2} = 1.5 \times 10^{-33}\text{cm}.$$

超弦理论宣称能对黑洞内发生的过程进行描述．

6.2.2 类星体

20 世纪 80 年代末，人类就已发现 4000 颗类星体（Quasi stellar object, Quasar)，其特征见表 6－8.

表 6－8　类星体的特征量

类星体名称	巨大的红移 z	巨大的距离（Mpc）	巨大的辐射能（$L_{\odot}$）
3C48	0.367	1700	2×10^{12}
3C147	0.545	2600	2×10^{12}
3C273	0.158	900	5×10^{12}
3C196	0.871	3200	1×10^{12}

就光度而言，太阳为 4×10^{26}W，银河系为 1×10^{37}W，类星体为 1×10^{40}W.

类星体大小（直径）用光时、光天来计量.

类星体光谱都发射可见光，非黑体辐射谱，是幂律谱，指数差别大，偏振度小于 10%；有光变，无周期性，光变持续几天、几月甚至几年；有发射谱线，由氢、氦、碳、氮、氧、氖、镁、硅等稀薄气体云产生.

多数类星体的红移大于 1，最大为 5，视速度为 0.946c.

类星体之迷：

（1）类星体巨大的红移是宇宙学红移，还是非宇宙学红移（光子衰老，黑洞引力红移，未知物理规律）？

（2）类星体巨大辐射能的来源是什么？



图 6－7　类星体

6.3 广义相对论与（经典）宇宙学模型

宇宙学模型可分为经典模型和量子模型．经典宇宙学模型的理论基础是广义相对论，量子宇宙学模型的理论基础是基本粒子理论和广义相对论．经典宇宙学模型的研究重点是宇宙如何演化与运行，量子宇宙学模型的研究重点是宇宙如何产生．宇宙学模型是建立在宇宙学观测事实的基础之上的．

6.3.1 现代宇宙学的四大基石

现代宇宙学是建立在四大宇宙学观测事实的基础之上的，它们分别是哈勃膨胀与哈勃定律、微波背景辐射、轻元素的形成以及宇宙的年龄．

6.3.1.1 哈勃膨胀与哈勃定律

1929 年，哈勃（E. Hubble）从 24 个临近星系的退行速度 v 和距离 d 的观测数据得出哈勃定律：$v = H_0 d$，其中哈勃常数 $H_0 =$ （50 ~ 80）$km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}$（见图 6 - 8）．

哈勃定律表明，宇宙在均匀膨胀，其退行速度与距离成正比．

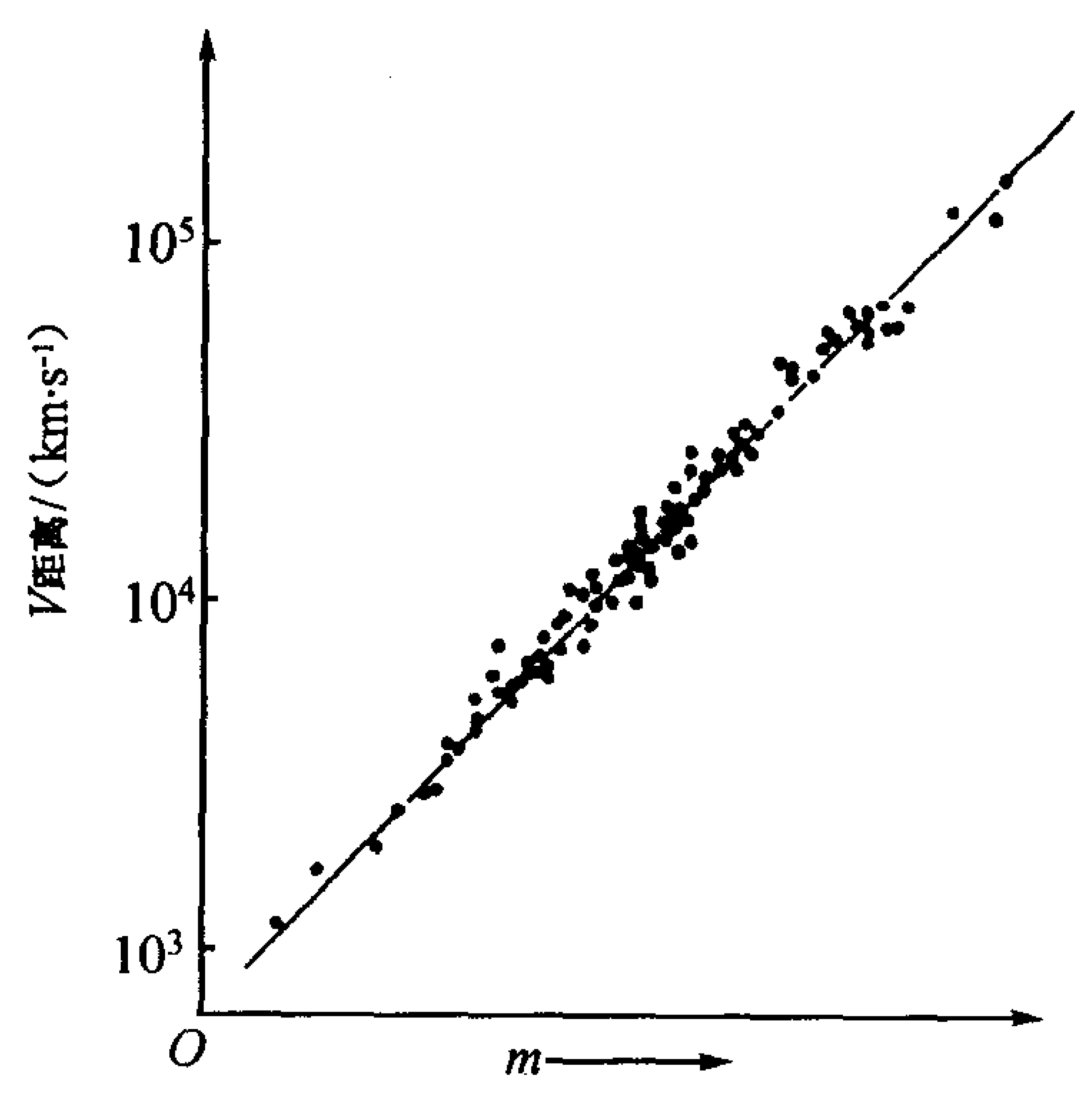


图 6 - 8　哈勃得到的退行速度 - 距离的关系

6.3.1.2　微波背景辐射

1949 年，伽莫夫根据哈勃膨胀提出，宇宙起源于一次大爆炸，原始火球因膨胀而冷却，留下今天的背景光子温度为 10K.

1964 年 5 月，贝尔实验室的彭亚斯和威尔逊从无线电天线的噪声中发现 3.5K（精确值为 2.736K）各向同性（各向异性度为 10^{-5}）的微波辐射（见图 6-9），并因此获得 1978 年诺贝尔物理学奖.

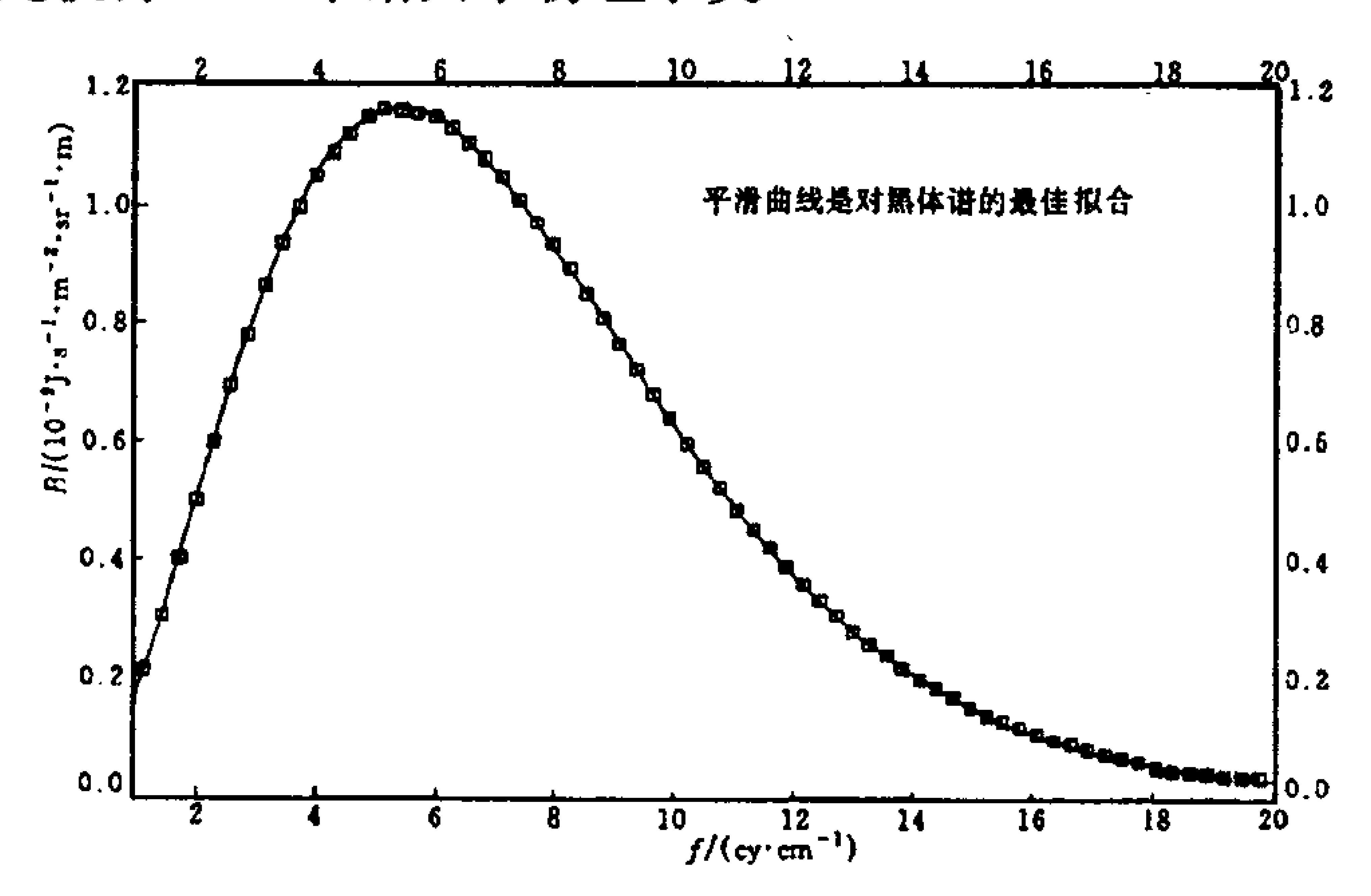


图 6-9　"宇宙背景探测者"卫星测得的背景辐射

6.3.1.3　轻元素的合成

观测所得宇宙各处氦的丰度为 24%.

1964 年，Hoyle Tayler 根据大爆炸宇宙论热演化史与核合成理论计算出氦的丰度为 23% ~ 25%. 后来，Wagoner、Fowler、Hoyle 又计算了 ^{3}He，D，^{7}Li 的丰度，其中 ^{3}He，^{7}Li 的丰度差 7 个量级（见图 6-10），但都与观测值完全吻合.

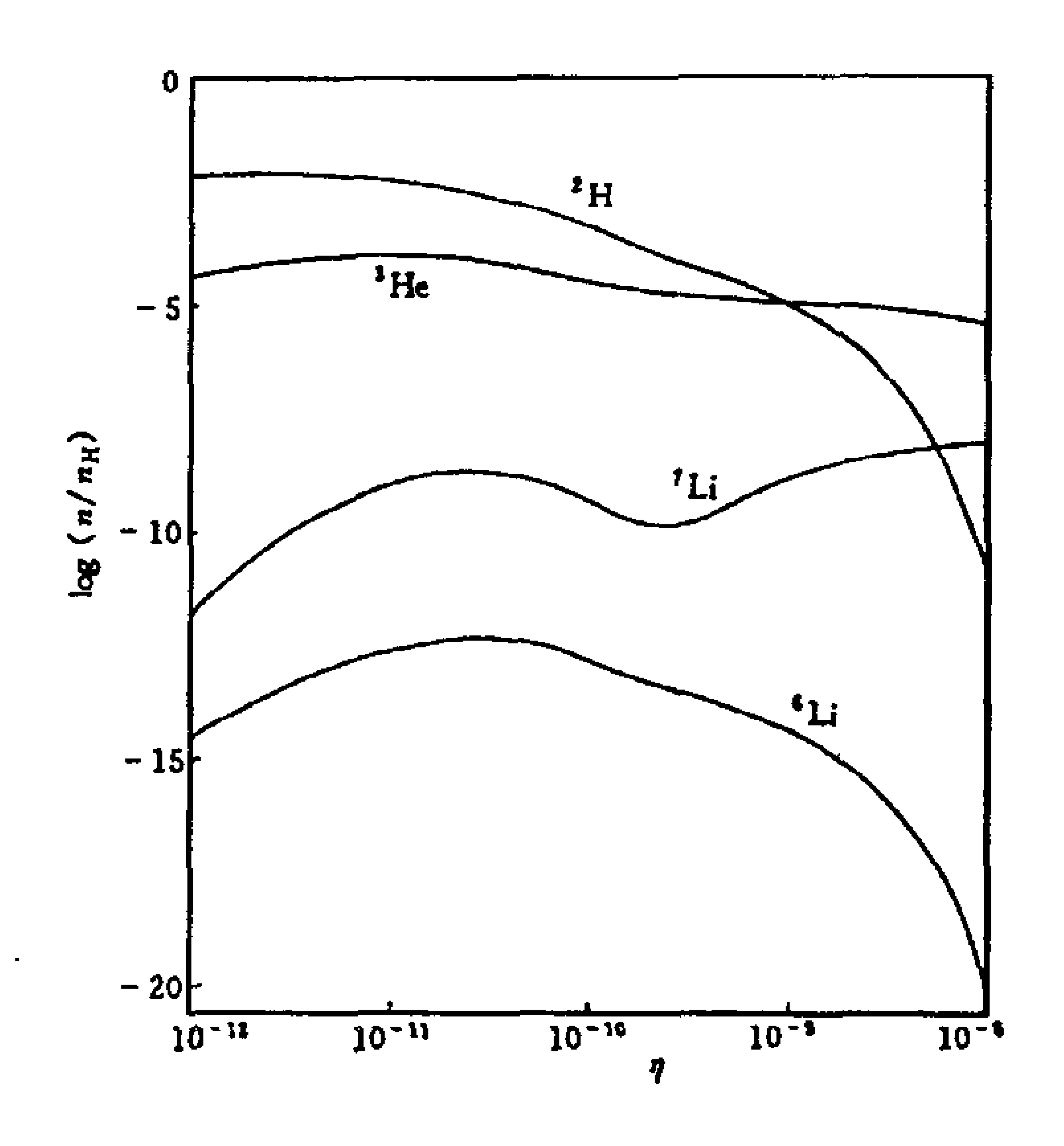


图 6-10　BNN 得到的宇宙轻元素丰度作为 η 的函数

6.3.1.4　宇宙的年龄

大爆炸宇宙论预测的宇宙年龄与古老天体年龄的观测值完全吻合.

6.3.2　宇宙数据

目前得出的有关宇宙的重要数据如下:

宇宙半径: $R=10^{26}$m	宇宙质量: $M=10^{22}M_{\odot}$
宇宙密度: $\rho=10^{-26}$kg/m^3	宇宙温度: 3K
宇宙年龄: $t=1.5\times10^{10}$a	宇宙熵: 10^{10}K
宇宙重子数: $N_b=10^{79}$	宇宙压强: 10^{-17}kPa

6.3.3　宇宙学原理

宇宙在空间大尺度（1.25～2）×300Mpc 范围内是均匀的和各向同性的, 宇宙中不存在特殊的中心和方向.

宇宙在小尺度上结团为星系、星系团、超星系团.

6.3.4　广义相对论与标准宇宙模型

广义相对论是标准宇宙模型的理论基础. 建立标准宇宙模型的步骤如下:

(1) 从爱因斯坦方程出发；

(2) 引进基于宇宙学原理的罗伯逊·沃尔克（Robertson Walker）度规；

(3) 输入宇宙物质的物态方程，得出宇宙的动力学方程——弗里德曼（Friedman）方程，即标准宇宙模型的方程.

6.3.4.1 爱因斯坦方程

下列等式称为爱因斯坦方程：

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R+\Lambda g_{\mu\nu}=-8\pi G T_{\mu\nu}.$$

式中，$g_{\mu\nu}$为度规张量，$R_{\mu\nu}$为黎曼曲率张量，R 为黎曼标量曲率，Λ 为宇宙学常数，$T_{\mu\nu}$为动量 - 能量张量．引力常数 $G=6.672\times10^{-11}\mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$.

6.3.4.2 罗伯逊·沃尔克宇宙度规

按照宇宙学原理，宇宙在空间上是均匀的和各向同性的，罗伯逊·沃尔克提出满足上述要求的宇宙度规为：

$$\mathrm{d}s^2=\mathrm{d}t^2-R^2(t)\left\{\frac{\mathrm{d}r^2}{1-kr^2}+r^2\mathrm{d}\theta^2+r^2\sin^2\theta\mathrm{d}\varphi^2\right\}.$$

式中，$\{r,\ \theta,\ \varphi\}$ 为共动坐标．r 不随时间变化，t 是在共动坐标系中由静止的观测者测得的宇宙原时，$R(t)$是随时间变化的宇宙尺度因子，它包含了宇宙膨胀的思想．k 是宇宙曲率常数，$k=1$ 时，闭合；$k=0$ 时，平坦；$k=-1$ 时，开放.

罗伯逊·沃尔克宇宙度规描述宇宙的时空结构，仅由一个函数 $R(t)$ 刻画，由它可得时间膨胀和宇宙学红移公式．由 $\{\mathrm{d}\theta=0,\ \mathrm{d}\varphi=0\}$ 可得：

$$\frac{\Delta t_0}{\Delta t_1}=\frac{R(t_0)}{R(t_1)}=\frac{\lambda_0}{\lambda_1}=1+z.$$

上式表明遥远星体发出的光的波长 λ_1 比今天地球上光的波长 λ_0 短了 $(1+z)$ 倍；遥远星体上的时钟比今天地球上的时钟走得快.

6.3.4.3 宇宙的动量 - 能量张量

均匀的和各向同性的宇宙介质的动量 - 能量张量的形式应和理想流体一样：

$$T^{\mu\nu}=(\rho+P)U^{\mu}U^{\nu}+Pg^{\mu\nu}.$$

其中 ρ，P 分别是介质的密度和压强，四维速度 $U^{\mu}=(1, 0, 0, 0)$.

6.3.4.4　宇宙的动力学方程

把罗伯逊·沃尔克宇宙度规和宇宙的动量 - 能量张量代入爱因斯坦方程，就得到标准宇宙模型的两个独立方程——弗里德曼（Friedman）方程：

$$\ddot{R}=-\frac{4\pi G}{3}(\rho+3P)+\frac{\Lambda}{3}R,$$

$$\dot{R}^2+k=\frac{8\pi G}{3}\rho R^2+\frac{\Lambda}{3}R^2$$

或

$$H^2=\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2=\frac{8\pi G}{3}\rho+\frac{\Lambda}{3}-\frac{k}{R^2}.$$

第一式描述宇宙加速膨胀，由物质、辐射和宇宙常数决定；第二式描述宇宙膨胀，由物质、宇宙常数和曲率决定.

6.3.4.5　物态方程：$P=P(\rho)$

由动量 - 能量守恒

$$T^{\mu\nu}_{;\nu}=0$$

可得

$$\frac{\mathrm{d}(\rho R^3)}{\mathrm{d}R}=-3PR^2.$$

由物态方程 $P=P(\rho)$ 可求得 $\rho=\rho(R)$，进而可求解 $R(t)$ 的方程.

从物质为主的宇宙（$\rho \gg P \approx 0$）得 $\rho=\frac{C}{R^3}$；从辐射为主的宇宙（$P=\rho/3$）得 $\rho=\frac{C}{R^4}$.

宇宙常数项大大延长了宇宙的寿命，加快了宇宙的膨胀.

6.4　大爆炸（量子）宇宙学

大爆炸（量子）宇宙学认为，宇宙产生于150亿年前高温高密度火球的一次大爆炸，其后的演化过程如下（见图 6 - 11）.

10^{-43}s：引力是量子化的，四种相互作用大统一.

10^{-35}s：发生最初暴涨，大统一终结，强力与弱电力分离，夸克数与光子数相等，光子数与重子数之比为 $10^9 \sim 10^{10}$.

10^{-32}s：暴涨结束，宇宙从 10^{-25}m 迅速膨胀至 0.1m，然后逐渐膨胀到现在的 10^{26}m；宇宙的主要组分是光子、正反夸克、有色胶子；质子不稳定，尚无元素形成.

10^{-12}s：弱力与电磁力分离，宇宙较平静.

$10^2 \sim 10^3$s：宇宙元素的原初合成.

10^{11}s：光子与重子退耦，宇宙从以辐射为主转变成以物质为主；电子与原子核结合成原子.

10^{16}s：星系、恒星、行星开始形成.

10^{18}s：现在，星系继续退行，宇宙温度继续下降，宇宙膨胀还在继续.



图 6－11　大爆炸宇宙的演化历史

6.5　宇宙的加速膨胀与暗物质、暗能量

可靠的天文观测数据表明，宇宙在加速膨胀，宇宙中存在着大量的暗物质和暗能量. 暗物质和暗能量的发现是物理学和天体物理学的重大事件，对暗物质和暗能量的解释构成了对天体物理学、宇宙学和基本粒子物理学的最大挑战.

6.5.1　暗物质

有人把暗物质比做 20 世纪和 21 世纪天文学和物理学理论“晴空”上的“乌云”.

1937 年，Zwicky 从星团中发现暗物质，暗物质决定了宇宙大尺度结构、星团与星系的形成、演化和命运（见图 6-12）.

暗物质被发现的观察证据:

(1) 处于 r 处的星系的旋转速度曲线（见图 6-13）. 当 $M(r)$ 为常数时，

$$V_{\text{rot}}=\sqrt{\frac{GM(r)}{r}}\longrightarrow r^{-1/2}.$$

观测为：$V_{\text{rot}}\longrightarrow C$，$M(r)\longrightarrow kr$，$\rho_{DM}(r)\longrightarrow r^{-2}$.

这表明在 r 以内有大量看不见的质量.

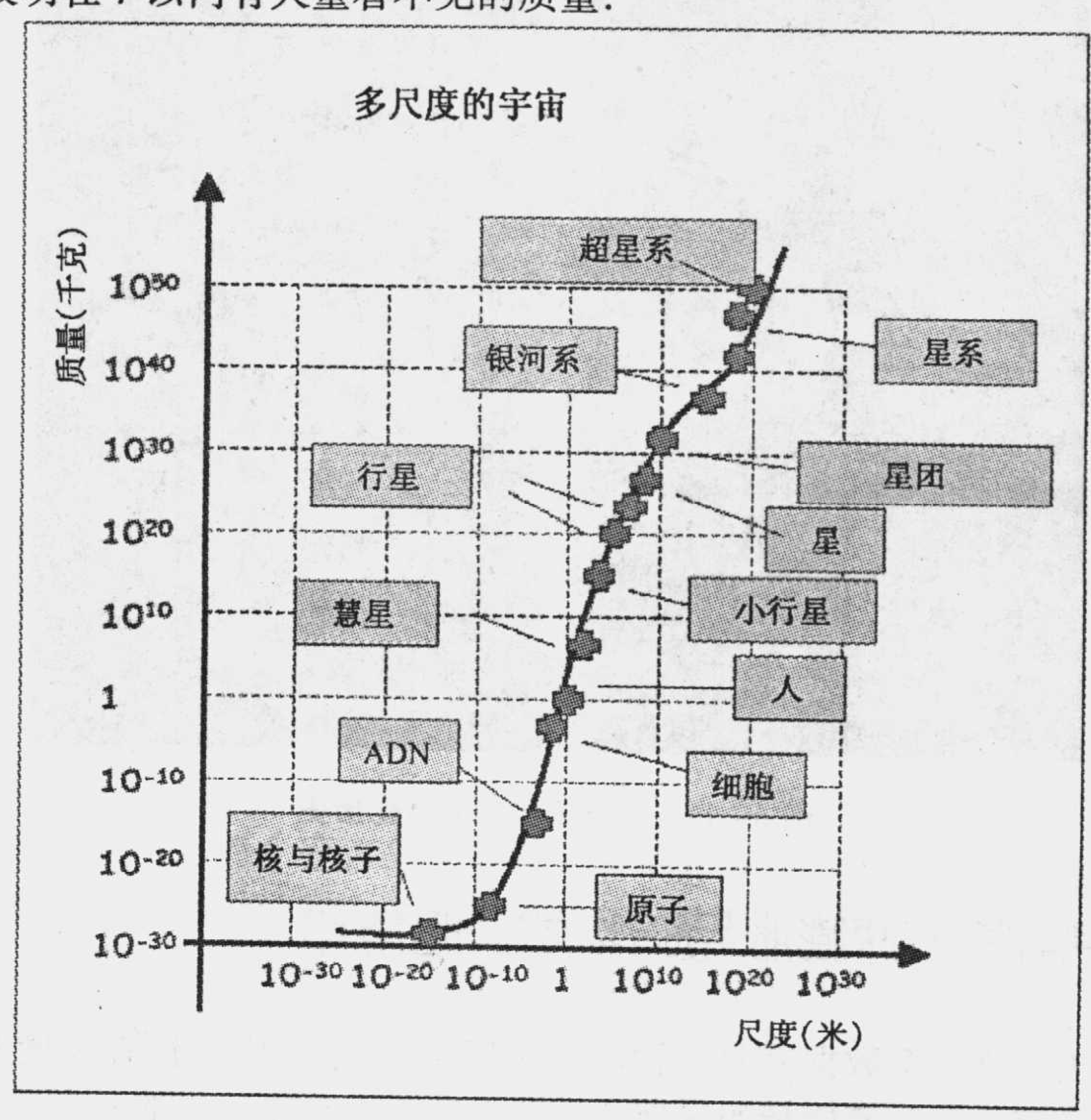


图 6-12　各种空间尺度上的宇宙物质

（2）质量为 m 的卫星星系和球状星系的引力潮汐半径 r.

$$\frac{r}{R} \approx \left[\frac{m}{M(R)}\right]^{1/3}.$$

由此推知银河系的质量为 $10^{12}M_{\odot}$，比河内发光物质的质量大 10 倍；对矮球状星系，由此推知的质量比天文观测值大 50～100 倍.

（3）重子物质与总物质的质量之比：

$$f_b = \frac{M_{\text{star}} + M_{\text{gas}}}{M_{\text{star}} + M_{\text{gas}} + M_{\text{dark}}} = 0.3.$$

这表明，宇宙中 70%以上的物质是暗物质. 按照现代粒子物理学的观点，这些不发光的暗物质可能是弱相互作用的重粒子（WIMPS）.

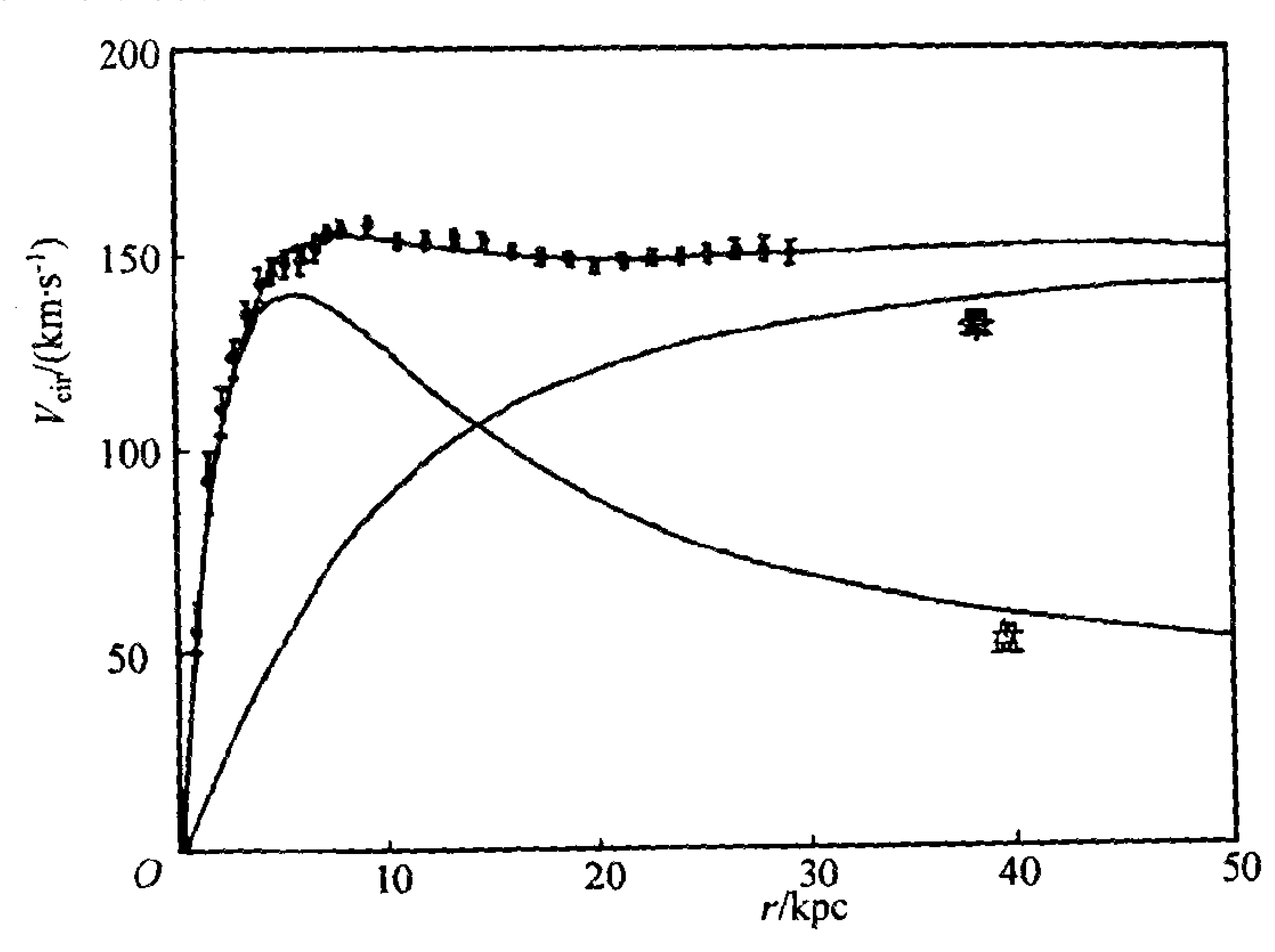


图 6－13　漩涡星系 NGC3189 的转动曲线

6.5.2　宇宙加速膨胀与暗能量

近年来，天文学的惊人发现是宇宙在加速膨胀，宇宙加速膨胀预示宇宙中大量暗能量的存在.

6.5.2.1　宇宙加速膨胀的事实依据

认为宇宙在加速膨胀是基于以下三个天文学观测事实：

（1）宇宙微波背景辐射（CMB）的各向异性（2001）；

（2）SNeIa 超新星的红移（1996，1998）；

（3）宇宙大尺度的幂律谱（2000，2001）.

6.5.2.2 宇宙加速膨胀预示宇宙中大量暗能量的存在

根据 Friedman 加速度方程：

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3}R.$$

由观测事实可知加速度大于零，即 $\ddot{R} > 0$.

由水星进动知 Λ 很小，如果把 Λ 很小推广至宇宙学范围，则要求有另一种暗物质存在，且具有负压强，即 $P < -\frac{1}{3}\rho$. 它以类辐射能的形式存在，但有负压强，均匀分布，在宇宙学大尺度范围起作用，称暗能量.

综上所述，宇宙中存在大量不发光的暗物质. 宇宙在加速膨胀表明宇宙中存在暗能量（占 66%）.

暗能量的发现完全超出了现代天文学和物理学认识的范畴，它暗示着 21 世纪天文学和物理学的革命已经拉开序幕.

现有人用第五物质（quintessence）的标量场来唯象地解释暗能量的宇宙学效应.

6.6 宇宙学问题与粒子物理学问题的关联

类星体能量的来源，暗物质、暗能量和黑洞的性质及其蕴涵的新的基本物理学定律，宇宙的产生、演化和结构的形成，宇宙的加速膨胀及其归宿，这些问题是 21 世纪天体物理学、宇宙学和粒子物理学面临的几大难题. 这些问题的解决将导致我们对所在宇宙真空背景的宇观性质、宏观性质和微观性质与规律的新认识. 正是宇宙真空背景的这些宇观的、宏观的和微观的性质与规律，决定了宇宙万物（从整个宇宙到基本粒子）的存在形式及其基本性质. 因此，这些问题的解决也将导致宇宙学和物理学，特别是粒子物理学的革命. 只有天体物理学、宇宙学与粒子物理学这几门学科密切合作与共同努力，才能解决这些世纪性的、革命性的、意义重大的科学难题. 现在，我们已经看到了这些科学难题所发出的灿烂而迷人的曙光的召唤. 这是本世纪青年物理学家的幸运，解决这些科学难题则是他们责无旁贷的历史使命.

【参考文献】

1　P. Black，G. Drake，L. Jossem 著，赵凯华等译．物理 2000：进入新千年的物理学．北京：北京大学出版社，2000
2　丁一宾．统一之路：90 年代理论物理前沿课题．长沙：湖南科学技术出版社，1997
3　〔美〕引力、宇宙学和宇宙线物理学专门小组．90 年代物理学：引力、宇宙学和宇宙线物理学．北京：科学出版社，1994
4　李宗伟，肖兴华．天体物理学．北京：高等教育出版社，2001
5　〔法〕约翰·皮尔，卢米涅．黑洞．长沙：湖南科学技术出版社，2003
6　斯蒂芬·霍金．万有理论：宇宙的起源与归宿．海口：海南出版社，三环出版社，2003
7　刘辽，赵峥．广义相对论．第 2 版．北京：高等教育出版社，2004
8　俞允强．物理宇宙学讲义．北京：北京大学出版社，2002
9　俞允强．热大爆炸宇宙学．北京：北京大学出版社，2001
10　赵峥．黑洞的热性质与时空奇异．北京：北京师范大学出版社，1999

第 7 章　量子信息、量子通讯与量子计算

7.1　量子力学简介

量子信息、量子通讯与量子计算是信息科学和计算机科学与量子力学的交叉，量子力学是其物理学基础．本章的讨论从量子力学开始．

7.1.1　量子力学基本原理

像所有动力学理论一样，量子力学的基本理论构架可分为运动学与动力学两个部分．

7.1.1.1　运动学

研究运动学的目的是解决运动状态的描述问题，它的具体任务是确定运动学变量及其代数关系．像经典力学一样，量子系统的基本运动学变量是广义坐标 $\hat{q}_i$ 和广义动量 $\hat{p}_i$，它们之间的代数关系为 Heisenberg 代数：

$$[\hat{q}_i,\ \hat{p}_j] = i\hbar\delta_{ij},$$

$$[\hat{q}_i,\ \hat{q}_j] = [\hat{p}_i,\ \hat{p}_j] = 0.$$

经典力学的基本运动学变量虽然也是广义坐标 q_i 和广义动量 p_i，但它们服从的却是 Poisson 代数：

$$\{q_i,\ p_j\} = \delta_{ij},$$

$$\{q_i,\ q_j\} = \{p_i,\ p_j\} = 0,$$

$$\{X(q,\ p),\ Y(q,\ p)\} = \frac{\partial X}{\partial q_i}\frac{\partial Y}{\partial p_i} - \frac{\partial X}{\partial p_i}\frac{\partial Y}{\partial q_i}.$$

运动学代数的不同使得量子力学的基本运动学变量 $\{\hat{q}_i,\ \hat{p}_i\}$ 成为不对易的算符（q - numbers)，而经典力学的基本运动学变量 $\{q_i,\ p_i\}$ 却是普通的可对易的数（c - numbers)．其后果是，力学量 $\hat{O}(\hat{q},\ \hat{p})$ 对应算符，状态用波

函数 ψ 描述.

既然量子力学的基本运动学变量是算符，那么由它们组成的物理学力学量也要成为算符，它们必须作用于具体的对象上才能给出物理上可观测量的数值. 量子力学的力学量算符作用的对象称为态矢（即状态矢量），它描述量子系统的状态，用$|\psi\rangle$ 表示，代表量子态几率幅. 所有态矢的集合构成量子态的无穷维Hilbert空间，力学量算符则是作用于 Hilbert 空间的算符. 态叠加原理使得量子态的 Hilbbert 空间成为矢量空间.

7.1.1.2 动力学

动力学的任务是确定运动状态如何随时间变化. 具体来说，就是确定$\{\hat{q}_i, \hat{p}_i\}$ 或者$|\psi\rangle$ 随时间变化的规律. 为此，动力学要解决以下三个问题：

(1) 惯性律：确定系统的质量 m.

(2) 力律：确定系统的势场 $V(\vec{r})$.

惯性律与力律二者确定了系统的厄密的哈密顿量：

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\vec{r}), \quad \hat{H}^+ = H.$$

(3) 运动方程：运动方程是能量守恒的微分形式，它决定系统的时间平移（微分演化）规律.

对力学量而言，其运动方程为 Heisenberg 方程. 对坐标与动量有

$$\frac{\mathrm{d}\hat{q}_i}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{i\hbar}[\hat{q}_i, \hat{H}],$$

$$\frac{\mathrm{d}\hat{p}_i}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{i\hbar}[\hat{q}_i, \hat{H}].$$

对一般力学量有

$$\frac{\mathrm{d}\hat{O}(\hat{q}, \hat{p})}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{i\hbar}[\hat{O}, \hat{H}].$$

对量子态而言，其运动方程为薛定格方程：

$$i\hbar\frac{\partial\psi(q, t)}{\partial t} = \hat{H}(q, \hat{p})\,\psi(q, t).$$

厄密的哈密顿量导致状态的幺正的时间演化算子：

$$\hat{U} = \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\hat{H}t/\hbar}, \quad \hat{U}^+(t) = \hat{U}^{-1}(t),$$

$$\psi(q, t) = \hat{U}(t, 0)\,\psi(q, 0),$$

$$\hat{O}(t)=\hat{U}^{+}(t)\hat{O}(0)\hat{U}(t).$$

7.1.1.3 观测理论

观测理论要解决的是理论对象（$\hat{O}$，ψ）与实验对象（观测量）之间的对应问题，这是量子论所特有的.

力学量对应于算符 $\hat{O}$，量子态对应于态矢 ψ，这使得量子力学理论处理的物理量与实验上的观测量之间有一个距离. 观测理论就是要回答如何从理论上的力学量算符和量子态波函数或态矢获得实验上的物理量的观测值. 其规则如下：

(1) $\psi(\vec{r})$ 是状态的几率幅，而 $|\psi(\vec{r})|^2$ 代表粒子在 r 处的几率密度.

(2) 只有力学量 $\hat{O}$ 的本征值 O_n 是可观测的. 一般情况下，观测到本征值 O_n 的几率为 p_n，多次观测可给出力学量 $\hat{O}$ 的平均值：

$$\langle\psi|\hat{O}|\psi\rangle=\sum p_n O_n.$$

其中

$$\psi=\sum C_n\psi_n,\qquad \hat{O}\psi_n=O_n\psi_n,\qquad p_n=|C_n|^2.$$

注意 ①量子力学的测量，一般是指对系统整体的测量；②量子信息与量子计算的测量则强调对系统各部分的测量.

7.1.2 量子力学的特点

量子力学具有与经典力学本质上不同的特点，这里归纳几条与量子信息和量子计算有关的特点.

(1) 状态波函数 $\psi(\vec{r})$ 是非定域的，它导致信息储存的非定域性.

(2) 多体波函数可以是纠缠的.

(3) 状态波函数 $\psi(\vec{r})$ 服从态叠加原理，这使量子比特储存信息的能力大大增加.

(4) 状态波函数 $\psi(\vec{r})$ 是几率波，这使得信息的获取是或然的.

(5) 测量通常要改变或破坏被测量的状态，导致量子态不可克隆，这也是量子保密通讯的物理基础.

上述五点中，(1)、(2) 两点一起构成信息远程传递的物理基础. (2)、(3) 两点一起构成平行运算的物理基础.

7.1.3　纯态与混合态

量子力学系统脱离不开环境，在环境的影响下，一个纯粹的量子力学态就变成混合态，量子力学就过渡到量子统计力学.

7.1.3.1　纯态与混合态

若量子系统的状态用一个波函数来描述，这个波函数服从薛定格方程，则这种以波函数和薛定格方程为基础的、对系统的描述就是量子力学的描述.

从量子统计力学的观点看，用一个波函数描述的系统的状态称为纯态，这样的系统称为纯粹系综. 在一般情况下，一个量子系统需要用几个或一系列波函数 ψ_1，ψ_2，…，ψ_n 来描述，每个状态以一定的几率 w_1，w_2，…，w_n 出现，但它们不能叠加产生一个新的量子态. 这样的量子状态称为混合态，这样的系统称为混合系综. 如把一个量子系统放在热槽中，由于受热槽的影响，系统的本征态 $\{E_n,\ \psi_n\}$ 会以 $w_n \approx e^{-E_n/kT}$ 的几率出现，其中几率 w_n 不是量子力学定律决定的几率，而是统计热力学定律决定的几率，因而是非量子的经典性的几率.

对于混合系综，前面介绍的描述纯粹系综的量子力学方法显然是不够的，必须寻求新的描述方法. 而现有的密度矩阵理论和 Green 函数理论正好适用于对混合系综的描述. 因为纯粹系综是混合系综的特例（纯粹系综 $W_0 = 1$，其他 $w_n = 0$），所以密度矩阵理论和 Green 函数理论自然也适合描述纯粹系综，其与波函数的描述是等价的.

7.1.3.2　密度矩阵理论

（1）密度矩阵与冯·诺意曼方程.

考虑具有二体相互作用的费米子系统，其哈密顿量为

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^{A} \hat{h}(i) + \frac{1}{2}\sum_{i \neq j}^{A} v(ij), \quad \hat{H}^{+} = H,$$

$$\hat{h}(i) = \frac{-\hbar^2}{2m_i}\nabla_i^2 + U(r_i).$$

时间有关的薛定格方程为

$$i\hbar \frac{\partial \psi_A(x)}{\partial t} = \hat{H}\psi_A(x). \qquad (7-1)$$

其共轭方程为

$$-i\hbar\frac{\partial\psi_A(x')^*}{\partial t}=H(x')\psi_A(x')^*. \quad (7-2)$$

由 $\psi_A(x)^*\times$ (7－1) 式－ (7－2) 式$\times\psi_A(x')$ 得

$$\frac{\partial\rho_A(x,x')}{\partial t}=\hat{H}(x)\rho_A(x,x')-\rho_A(x,x')\hat{H}(x') \quad (7-3)$$

上式称为冯·诺意曼方程，是 A 个粒子系统的密度矩阵

$$\rho_A(x,x',t)=\psi_A(x,t)\psi_A^*(x',t)$$

所满足的方程. $\rho_A(x,x',t)$ 是密度矩阵算符（统计算符）$\hat{\rho}_A$ 在坐标表象的矩阵元. 写成算符形式后，冯·诺意曼方程变为

$$i\hbar\frac{\partial\hat{\rho}_A}{\partial t}=[\hat{H}\hat{\rho}_A-\hat{\rho}_A\hat{H}]=\hat{L}_H\hat{\rho}_A. \quad (7-4)$$

$\hat{L}_H$ 是对应于 $\hat{H}$ 的冯·诺意曼算符（或量子刘维算符），$\hat{\rho}_A$ 的抽象（Dirac 符号）表示为

$$\hat{\rho}_A=|\psi_A\rangle\langle\psi_A|.$$

在 X～表象中的矩阵元为

$$\langle x|\hat{\rho}_A|x'\rangle=\langle x|\psi_A\rangle\langle\psi_A|x'\rangle=\psi_A(x)\psi_A^*(x').$$

可证冯·诺意曼方程 (7－3)、(7－4) 与薛定格方程 (7－1) 等价.

冯·诺意曼方程可以推广到混合系综的情况，这时，

$$\hat{\rho}_A=\sum_n w_n|\psi_n\rangle\langle\psi_n|,\sum_n w_n=1,\dot{w}_n=0.$$

$$i\hbar\frac{\partial\hat{\rho}_A}{\partial t}=(\hat{H}\hat{\rho}_A-\hat{\rho}_A\hat{H})=\hat{L}_H\hat{\rho}_A.$$

其中：

$$\hat{H}|\psi_n\rangle=E_n|\psi_n\rangle,\qquad\langle\psi_n|\psi_m\rangle=\delta_{nm}.$$

由于混合态分布几率 w_n 是外部引进的、与时间无关的，因此冯·诺意曼方程描述的混合系综的动力学演化是由 $\psi_n(x,t)$ 的量子动力学演化引起的 $\hat{\rho}_A(t)$ 的动力学演化. 在 $\hat{\rho}_A$ 中，$\psi_n(x,t)$ 是量子力学动力学量，而 w_n 是外在的统计量.

冯·诺意曼方程 (7－3) 的解为：

$$\rho_A(t)=\hat{U}(t)\rho_A(0)\hat{U}^+(t). \quad (7-5)$$

$$\hat{U}=e^{-i\hat{H}t/\hbar}.$$

这表明，密度矩阵的时间演化由动力学量 $\hat{H}$决定. (7-5) 式是量子运算（操作）的物理基础.

(2) 约化密度矩阵及其运动方程.

引进 n 体约化密度矩阵（Sp = tr = 求迹 = 对连续变量积分，对不连续变量求和）.

$$\rho_n(12\cdots n;1'\ 2'\ \cdots\ n')$$
$$=\frac{1}{(A-n)!}\underset{(n+1\cdots A)}{\mathrm{tr}}\rho_A(12\cdots n\ n+1\cdots A;1'\ 2'\ \cdots n\ 'n+1\cdots A)$$
$$=\frac{1}{(A-n)!}\int \mathrm{d}x_{n+1}\cdots \mathrm{d}x_A\rho_A(x_1\cdots x_nx_{n+1}\cdots x_A;x_1'\cdots x_n'x_{n+1}'\cdots x_A).$$

令单粒子（一体）密度矩阵 $\rho_1(x,\ x')=\rho(x,\ x')$，其对角元素 $\rho(x,\ x)$ 表示多体系统在 x 点的粒子密度；二体密度矩阵 ρ_2 的对角元 $\rho_2(x_1x_2;\ x_1x_2)$表示在 x_1 和 x_2 两点各有粒子的联合密度，其余以此类推. $\hat{\rho}_n$ 的非对角元体现出粒子间的量子力学波函数的相干性，包含着物质波的相位信息. 因此，量子力学波函数作为物质波的动力学信息，主要包含在 $\hat{\rho}_n$ 的非对角元之中，它们真正体现出量子力学的关联.

由冯·诺意曼方程可推出 ρ_n 的运动方程，该方程组叫做 BBGKY 系列，是链条式耦合的非线性的方程组系列，与冯·诺意曼方程等价. 但它已把描述多体系统的总体性质 ρ_A 的方程，分解成 ρ_1，ρ_2，ρ_3，…，ρ_n 等一系列描述部分粒子集团的信息的方程，ρ_n 所描述的 n 个粒子集团的子结构正好包含量子多体系统的 n 体关联. BBGKY 系列的缺点是没有提供一个合理而系统的截断方案，因而这个众多（几乎无限）的方程组系列不能截断求解. 克服这一缺点的努力导致关联密度矩阵动力学的建立.

(3) 两类不同自由度的约化密度矩阵及其运动方程.

一个量子体系有两类不同的自由度，人们关心的相关的自由度是 $\{X_i\}$，不大关心的非相关的自由度是 $\{\xi_j\}$. 系统的哈密顿量为

$$\hat{H}\ (X;\ \xi)\ =\hat{H}_0\ (X)\ +\hat{H}_1\ (\xi)\ +\hat{H}_{\mathrm{int}}\ (X,\ \xi).$$

从时间有关的薛定格方程

$$i\hbar\frac{\partial\psi\ (X,\ \xi,\ t)}{\partial t}=\hat{H}\ (X,\ \xi)\ \psi\ (x,\ \xi,\ t)$$

可得冯·诺意曼方程

$$i\hbar\frac{\partial\rho\ (X,\ \xi,\ X',\ \xi',\ t)}{\partial t}=\ [\hat{H},\ \rho]$$

$$= \hat{H}(X, \xi)\rho(X, \xi, X', \xi', t) - \rho(X, \xi, X', \xi', t)\hat{H}(X', \xi').$$

若只对子系统 $\{X_i\}$ 感兴趣，则可以把 $\{\xi_i\}$ 自由度积分掉，得 $\{X_i\}$ 空间的约化密度矩阵：

$$\rho(X, X', t) = \mathop{\mathrm{tr}}_{(\xi)} \rho(X_i, \xi_i, X_i', \xi_i, t),$$

及其运动方程

$$i\hbar \frac{\partial \rho(X, X', t)}{\partial t} = \mathop{\mathrm{tr}}_{(\xi)} [\hat{H}(X\xi)\rho(X\xi, X'\xi', t) - \rho(X\xi, X'\xi't)\hat{H}(X'\xi')].$$

进而计算 $\{X_i\}$ 空间的力学量 $\hat{O}(X, \hat{P})$. 反之，可得 $\{\xi_i\}$ 空间的约化密度矩阵：

$$\rho(\xi, \xi', t) = \mathop{\mathrm{tr}}_{(X)} \rho(X_i\xi_i, X_i'\xi_i, t),$$

及其运动方程，并计算相应的力学量 $\hat{O}(\xi, \hat{P}_\xi)$ 的平均值.

例如，一个谐振子在热槽的影响下运动，则振子自由度 $\{X_i\}$ 是我们关心的自由度，热槽分子的自由度 $\{\xi_i\}$ 是我们不大关心的自由度. 对 $\{\xi_i\}$ 积分求迹相当于只考虑热槽对振子的总体平均影响而不考虑其细节.

7.2 量子力学与信息论

要把信息论和常规的自然科学，特别是量子力学放在一个框架内加以考察，就需要用统一的观点去观察自然界和人类社会.

7.2.1 自然界和人类社会的三大要素

自然界和人类社会的物质运动都有三大要素，它们之间存在本质性的对应：

自然界的三大要素	人类社会的三大要素
物质，能量，运动状态	物质，能量，信息

因为运动状态是物质和能量存在的具体形式，是信息的载体；运动状态和信息则是同一事物的两个方面：从物理学考察的是运动状态，从信息论考察的是信息的载体，因此运动状态与信息的对应是本质性的.

7.2.2 信息论[①]

信息论研究信息的本质，以及信息的产生、存储、传输、编码、译码，信道的有效性与可靠性，噪声的影响等问题.

7.2.3 信息论与物理学

信息论与物理学的本质联系是信息需要物理载体，物理态可以储存信息；信息是编码在物理态上的知识，是对物理态时空结构的编码；信息的提取是对编码的物理态的测量；信息的传输是编码的物理态的传输；信息的加工处理是在计算机中对编码的物理态进行的有控制的动力学演化. 信息的存储、提取、传输、处理需要借助物理手段. 计算机是处理信息的物理实体.

7.2.4 经典信息论与量子信息论

量子信息论是以量子力学作为物理学基础的. 利用经典态进行信息的编码、处理和传输，就是经典信息论；利用量子态进行信息的编码、处理和传输，就是量子信息论.

7.2.5 量子计算与量子通讯

量子信息论是量子通讯和量子计算的基础. 基于量子信息论原理的计算称为量子计算；基于量子信息论原理的通讯称为量子通讯.

7.2.6 量子计算与量子通讯的优点和必要性

7.2.6.1 经典计算的极限与缺陷

摩尔法则：每经过 18 个月，CPU 处理能力会增加一倍，价格会降低一倍.

芯片线宽：$0.2\mu \to 0.1\mu$，达到经典物理极限，芯片设计必须考虑量子效应.

芯片的热耗散：经典逻辑运算的不可逆性会导致严重的芯片热耗散的产生.

---

① Shannon：通讯的数学理论. 1948

7.2.6.2 量子计算的优点

量子计算除平行运算带来的高速度外，还有经典计算机所没有的特点：量子计算是可逆的，只产生很小的能量耗散；量子相干性和纠缠带来的新算法使运算加速.

7.2.6.3 量子通讯的优点

量子通讯的优点是量子密码不可破译.

7.2.7 量子信息学与量子计算已取得的成绩

(1) 建立了 Shannon 编码定理的量子推广.

(2) 量子纠缠现象已用于量子通讯，创造了经典信息论所没有的“绝对安全密钥”、“稠密编码”和“隐形传态”.

(3) 构造出“大数质因子分解”，“未整理的数据库搜索”等量子算法.

(4) 在局域网上实现了量子密钥分配.

(5) 实现了量子隐形传态.

(6) 物理上实现了量子基本逻辑门运算.

7.3 量子信息

量子信息是编码在量子物理态上的信息. 量子信息的储存、加工和传递，在很大程度上依赖于量子态的纠缠特性.

7.3.1 量子纠缠

量子纠缠是多粒子系统量子态的特征，具有非定域性，在量子信息中扮演着十分重要的角色，为信息传递和信息处理提供了物理资源.

7.3.1.1 复合系统纯态的 Schmidt 分解

由两个子系统组成的复合系统的波函数可做以下分解：

$$|\psi\rangle = \sum_m \sqrt{\rho_m} e^{i\alpha_m} |\phi_m^{(1)}\rangle\ |\phi_m^{(2)}\rangle,$$

其中，$|\phi_m^{(1)}\rangle$，$|\phi_m^{(2)}\rangle$ 是下述约化密度矩阵的本征态：

$$\hat{\rho}=|\psi\rangle\langle\psi|,\quad \hat{\rho}^{(1)}=\mathrm{tr}_{(2)}\hat{\rho},\quad \hat{\rho}^{(2)}=\mathrm{tr}_{(1)}\hat{\rho}.$$

$$\hat{\rho}^{(i)}|\phi_m^{(i)}\rangle=\rho_m|\phi_m^{(i)}\rangle\ (i=1,\ 2).$$

$|\phi_m^{(1)}\rangle$，$|\phi_m^{(2)}\rangle$ 称为对偶基，它们是正交规一的，即

$$\langle\phi_m^{(i)}|\phi_n^{(i)}\rangle=\delta_{mn},\quad \sum_m\rho_m=1.$$

7.3.1.2　量子纠缠的定义

若两个子系统构成的复合系统处于纯态 ψ，且 ψ 的对偶基展开中包含两项以上，则称 ψ 是一个纠缠态.

两个子系统 $\{A,\ B\}$ 构成的复合系统所处的混合态 $\hat{\rho}$ 为纠缠混合态的充要条件是，当且仅当它不能展开成

$$\hat{\rho}(A,\ B)=\sum_i P_i|\psi_i(A,\ B)\rangle\langle\psi_i(A,\ B)|.$$

其中每个 $|\psi_i(A,\ B)\rangle$ 都是非纠缠的.

例如：

$$|\psi\rangle=a|0^{(1)}\rangle|0^{(2)}\rangle+b|1^{(1)}\rangle|1^{(2)}\rangle$$

是纠缠态，当 $a=b=\pm\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时是最大纠缠态. 具有最大纠缠的量子态是量子信息的最好载体.

7.3.1.3　量子纠缠的度量 $E(\rho)$

(1) 纠缠度量 $E(\rho)$ 应具备的必要条件：

①对可分离的 ρ，纠缠度为零，即

$$\rho=\sum_i P_i\rho_i^A\otimes\rho_i^B\otimes\cdots\otimes E(\rho)=0.$$

②对各个部分的局域的幺正演化 $\hat{U}_A$，$\hat{U}_B$，…，纠缠度量 $E(\rho)$ 不变.

③对由经典通讯联系起来的相关各部分的局域操作（LOCC），$E(\rho)$ 不增加.

④对不相关的复合系统 $\psi^{AB}\otimes\Phi^{AB}\otimes\cdots$，纠缠度量 $E(\rho)$ 具有相加性：

$$E(\psi^{AB}\otimes\Phi^{AB}\otimes\cdots)=E(\psi^{AB})+E(\Phi^{AB})+\cdots.$$

(2) 两组份系统的纠缠度量 $E(\rho)$ 的性质：

①对于纯态，用约化密度矩阵的 Von Neumann 熵 $S(\rho)$ 度量：

$$E(\rho^{AB})=S(\rho^{AB})=S(\rho^A)=S(\rho^B).$$

对于 Bell 基：$E(\rho^{AB})=1$.

为了推广到混合态，Wooters 给出了另外一种等价表示.

②对于混合态，纠缠度量问题没有完全解决，有下面几种定义：

结构纠缠——E_F（ρ^{AB}）；Wooters 纠缠——E_W（ρ^{AB}）；

蒸馏（浓缩）纠缠——E_D（ρ^{AB}）；相对纠缠——E_{Re}（ρ^{AB}）.

且有 $E_D \leqslant E_{Re} \leqslant E_F$.

对于纯态，$E_D = E_F = E = S(\rho)$.

(3) 两组份纠缠态在 LOCC 操作下的变换，可用 Majorization 数学理论研究，它基于以下定理：

定理 纠缠 ψ 态可用 LOCC 操作变为纠缠态 φ 的充要条件是：φ 必须大于（majorize）ψ，即 $\lambda_\varphi > \lambda_\psi$. 其中 λ_x 是约化密度矩阵的本征矢量的排序矢量，即

$$\rho_B[x] = \mathrm{tr}_A\rho_{AB}[x] = \mathrm{tr}_A|x(AB)\rangle\langle x(AB)|,\quad x=\psi,\varphi.$$

7.3.1.4 量子纠缠的蒸馏（浓缩）

对于具有量子纠缠（$E(\rho)\neq 0$）的量子混合态 ρ，可通过物理操作提取或浓缩量子纠缠.

7.3.1.5 量子纠缠的稀释

对于具有量子纠缠（$E(\rho)\neq 0$）的量子混合态 ρ，可通过物理操作稀释量子纠缠.

7.3.1.6 作为物理资源的量子纠缠

量子纠缠是量子信息的储存、加工和传递的物理基础，因此是量子通讯和量子计算的物理资源. 具有最大纠缠的量子态是量子信息的最好载体，是最好的物理资源.

7.3.2 量子编码

量子编码是在量子态和码字之间建立一一对应的关系.

7.3.3 量子信息

通过量子编码，可把信息储存在量子态上. 量子态上荷载的信息叫做量子信息.

7.3.4 量子信息的特征

7.3.4.1 量子不可克隆（No - cloning）定理

一个未知的量子态不能被完全拷贝，我们将其称为量子不可克隆定理.

7.3.4.2 量子隐形传态（Teleportation）

利用量子态的非定域性，通过一定的量子门操作，把一个未知的量子态从一处传到另一处，叫做量子隐形传态.

现以一个量子位上记载的信息传递为例，描述这一过程. 设要传递的未知量子态处于量子位 1，Alice 处于与量子位 1 临近的量子位 2，Bob 处于远离量子位 1 的量子位 3. 量子位 1 上的未知量子态一般可写为：

$$|\alpha\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle.$$

设 Alice 和 Bob 已通过某种物理手段建立起量子位 2 和 3 之间的量子纠缠，而且处于最大的量子纠缠态：

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle).$$

作为三个量子位的多体系统的初态则为

$$|\Psi_0\rangle = |\alpha\rangle|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a|000\rangle + b|100\rangle + a|011\rangle + b|111\rangle).$$

首先，Alice 对 $|\Psi_0\rangle$ 的 1 和 2 量子位进行控制非门操作 C_{NOT}：

$$C_{NOT}|00\rangle = |00\rangle,\ C_{NOT}|01\rangle = |01\rangle,$$
$$C_{NOT}|10\rangle = |01\rangle,\ C_{NOT}|11\rangle = |10\rangle.$$

得到

$$|\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a|000\rangle + b|110\rangle + a|011\rangle + b|101\rangle).$$

其次，Alice 对 $|\Psi_1\rangle$ 的第一量子位进行 H 门操作：

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle),\ H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle),$$

得到

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{2}[|00\rangle(a|0\rangle + b|1\rangle) + |10\rangle(a|0\rangle - b|1\rangle)$$

$$+|01\rangle(a|0\rangle+b|1\rangle)+|11\rangle(a|0\rangle-b|1\rangle)].$$

最后，Alice 再对$|\Psi_2\rangle$的 1 和 2 两个量子位进行测量，$|\Psi_2\rangle$就会塌缩到上述四个量子态之一，Alice 把测量所得的这个塌缩的量子态的 1 和 2 两个量子位上的量子态的信息，通过经典通讯方式用经典信息的形式告诉 Bob，Bob 就知道如何对第三个量子位再进行一个相应的局域量子操作，并在此量子位上重现第一量子位上的$|\alpha\rangle$量子态，实现未知量子态$|\alpha\rangle$从 Alice 处到 Bob 处的远程传递.

7.4 量子通讯

7.4.1 量子位

（1）量子位：一个量子比特（qubit）从物理上看是一个双态量子系统，这一双量子态可表示为$|0\rangle$和$|1\rangle$.

一个经典比特的信息量为：$|0\rangle$和$|1\rangle$.

一个量子比特的信息量为：$|\Psi\rangle=a|0\rangle+b|1\rangle$，$|a|^2+|b|^2=1$.

一个量子位是二维 Hilbert 空间中所有长度为 1 的态矢，而经典位只是这个二维 Hilbert 空间中长度为 1 的两个基矢.

n 个量子位（n - qubit）是 2^n 维 Hilbert 空间中所有长度为 1 的态矢，是 2^n 维模平方之和归一化为 1 的所有复数，而 2^n 个经典位只是这个 2^n 维 Hilbert 空间中 2^n 个长度为 1 的基矢.

布洛赫球用于单位量子位的几何表示：

一个量子位的状态$|\Psi\rangle=a|0\rangle+b|1\rangle$，$|a|^2+|b|^2=1$应当用三个欧勒角表示，即

$$|\Psi\rangle=e^{i\alpha}\left(e^{i\gamma}\cos\frac{\theta}{2}|0\rangle+e^{i(\gamma+\varphi)}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle\right).$$

考虑到一个量子位的总相位 α 不能观测，即

$$|\Psi(\theta,\varphi)\rangle=\left(\cos\frac{\theta}{2}|0\rangle+e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle\right),$$

状态参数只剩下(θ,φ)，故可用布洛赫球（半径为 1 的球）上的一点(θ,φ)表示$|\Psi(\theta,\varphi)\rangle$.

对于多量子位，每个量子位 α 的相位有相干效应，因此每个量子位应当

用三个欧勒角表示.

为实现每个单量子位的操作（单位量子门），需考虑总相位 α.

(2) 量子位的物理实现.

量子位的物理实现有以下几种方式：二能级天然原子，用量子点构成的二能级人造原子；自旋为 1/2 的带磁矩的粒子，左旋和右旋偏振光子，微腔光场等.

7.4.2 量子逻辑门

量子信息的处理是对编码的量子态进行的一系列幺正变换操作. 对量子位的最基本的幺正变换操作是量子逻辑门. 按照操作涉及的量子位的数目，量子逻辑门可分为一位门、二位门和三位门.

7.4.2.1 一位门

一位门是对一个量子位的基本操作，共有 6 个. 设基矢为二分量列矢：

$$|0\rangle = \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix},\ |1\rangle = \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}.$$

(1) 恒等操作：

$$\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{bmatrix} = |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|,$$

$$\boldsymbol{I}|0\rangle = |0\rangle,\quad \boldsymbol{I}|1\rangle = |1\rangle.$$

(2) 相位门：

$$\boldsymbol{P}(\theta) = \begin{bmatrix}1 & 0\\0 & e^{i\theta}\end{bmatrix} = |0\rangle\langle 0| + e^{i\theta}|1\rangle\langle 1|,$$

$$\boldsymbol{P}(\theta)|0\rangle = |0\rangle,\quad \boldsymbol{P}(\theta)|1\rangle = e^{i\theta}|1\rangle.$$

(3) 非门：

$$\boldsymbol{X} = \sigma_x = \begin{bmatrix}0 & 1\\1 & 0\end{bmatrix} = |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|,$$

$$\boldsymbol{X}|0\rangle = |1\rangle,\quad \boldsymbol{X}|1\rangle = |0\rangle.$$

(4) $\boldsymbol{Z}$ 操作：

$$\boldsymbol{X} = \sigma_z = \begin{bmatrix}1 & 0\\0 & -1\end{bmatrix} = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|,$$

$$\boldsymbol{Z}|0\rangle = |0\rangle,\quad \boldsymbol{Z}|1\rangle = -|1\rangle.$$

(5) $\boldsymbol{Y}$ 操作：

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{ZX}=i\sigma_y=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{bmatrix}=|0\rangle\langle 1|-|1\rangle\langle 0|,$$

$$\boldsymbol{Y}|0\rangle=-|1\rangle,\ \boldsymbol{Y}|1\rangle=|0\rangle.$$

(6) Hadamard ($\boldsymbol{H}$) 门：

$$\boldsymbol{H}=\frac{1}{\sqrt{2}}(\boldsymbol{X}+\boldsymbol{Z})=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{bmatrix}$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle\langle 0|-|1\rangle\langle 1|+|1\rangle\langle 0|+|0\rangle\langle 1|).$$

$$\boldsymbol{H}|0\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle),\ \boldsymbol{H}|1\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle).$$

(7) 通用一位门：

$$\boldsymbol{U}(\alpha,\beta,\gamma,\delta)=e^{i\alpha}\begin{bmatrix}e^{-i(\beta+\delta)/2}\cos\frac{\gamma}{2} & -e^{-i(\beta-\delta)/2}\sin\frac{\gamma}{2}\\ e^{i(\beta-\delta)/2}\sin\frac{\gamma}{2} & e^{i(\beta+\delta)/2}\cos\frac{\gamma}{2}\end{bmatrix}.$$

由此得：

$$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{U}(0,0,0,0),\ \boldsymbol{X}=\boldsymbol{U}(-\frac{\pi}{2},\pi,\pi,0),\ \boldsymbol{Y}=\boldsymbol{U}(\frac{\pi}{2},\pi,\pi,\pi),$$

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{U}(\frac{\pi}{2},\pi,0,0),\ \boldsymbol{H}=\boldsymbol{U}(\frac{\pi}{2},0,\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}).$$

上述通用一位门可用 Heisenberg Cluster 或核磁共振系统来实现.

7.4.2.2 两位门

两位门是对两个量子位施行的基本逻辑操作.

(1) 控制 U 门：

$$C_U=|0\rangle\langle 0|\otimes I+|1\rangle\langle 1|\otimes U.$$

第一位是控制位，第二位进行由第一位控制下的运算.

若第一位是$|0\rangle$，则对第二位进行恒等运算；若第一位是$|1\rangle$，则对第二位进行 U 运算.

(2) 控制非门 ($U=X$)：$U=$ NOT.

$$C_{NOT} = |0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$C_{NOT}|00\rangle = |00\rangle, \quad C_{NOT}|01\rangle = |01\rangle,$$
$$C_{NOT}|10\rangle = |11\rangle, \quad C_{NOT}|11\rangle = |10\rangle.$$

7.4.2.3　三位门

三位门是对三个量子位施行的基本逻辑操作．例如，对第三位进行的控制-控制 U 门的运算：仅当第一、第二位是 $|11\rangle$ 时，才对第三位进行 U 运算，否则，进行恒等运算；若 $U = X$，则是三位控制-控制非门运算，这种三位门叫做 Toffoli 门．

7.4.3　量子通讯

量子通讯是对编码在量子态上的信息进行远程传送．量子通讯模型如图 7-1所示．

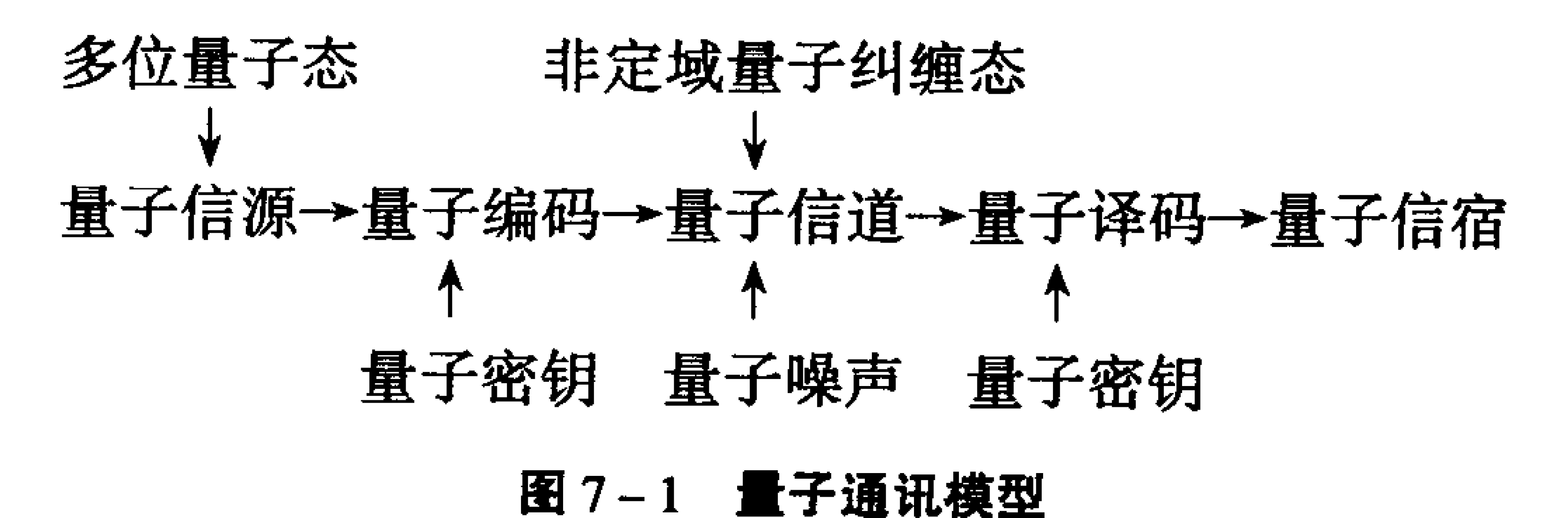


图 7-1　量子通讯模型

上图中间一行表示量子通讯的基本流程，上下两行表示实现上述流程的物理实体或影响上述流程的物理因素．

量子噪声引起量子退相干，从而破坏量子信息．

量子密钥是通过非正交量子态来实现的，从而使量子密钥不可能被破译．

目前，已实现了在十几千米范围内利用激光信息通道的量子通讯．

7.5 量子噪音与量子运算（操作）

7.5.1 密度矩阵量子态 ρ 的变化

对于量子混合态，要用密度矩阵 ρ 表示量子态．量子态的变化有以下三类．

(1) 幺正动力学演化 $\hat{U}(t)$ 引起的 ρ 的变化：

$$\rho'(t) = \hat{U}^+(t)\rho(0)\hat{U}(t).$$

(2) 量子测量 M_m 引起的 ρ 的变化．一般有

$$\rho_m = M_m \rho M_m^+.$$

对于投影性测量：

$$E_m = |m\rangle\langle m|, \quad \rho_m = E_m\rho = |m\rangle\langle m|\rho.$$

原来的状态经测量被投射到子空间 $E_m = |m\rangle\langle m|$ 中．

(3) 量子耗散动力学演化．在环境量子噪音的影响下，量子态的动力学演化（随机和耗散的量子动力学过程）与大系统（包括环境 E 和主系统 S）的状态 $\rho(t, E, S)$ 服从幺正动力学演化规律，但其哈密顿量和时间演化算子应包含环境 E 和主系统 S 的自由度：

$$\hat{H} = \hat{H}(E, S), \quad \hat{U}(t) = \hat{U}(t, E, S),$$

$$i\hbar \frac{\partial\hat{\rho}(t, E, S)}{\partial t} = (\hat{H}\hat{\rho} - \hat{\rho}\hat{H}) = \hat{L}_H(E, S)\hat{\rho}(t, E, S),$$

$$\rho(t, E, S) = \hat{U}^+(t, E, S)\rho(0, E, S)\hat{U}(t, E, S).$$

用约化密度矩阵理论消去环境自由度后，主系统的演化服从量子主方程：

$$\dot{\rho}(t,S) = \frac{1}{i\hbar}\mathrm{tr}\hat{L}_{ES}\rho(t,E,S) = \hat{\Gamma}(t,S)\rho(t,S),$$

$$\rho(t,S) = \mathrm{tr}_E\rho(t,E,S).$$

$$\rho'(t,S) = T\exp\left(\int_0^t \hat{\Gamma}(\tau)\,\mathrm{d}\tau\right)\rho(0,S).$$

7.5.2 量子态变化的一般描述

7.5.2.1 量子运算（操作）

量子态 $\rho(0) \to \rho(t)$ 的变化，可以概括为一般的映射形式：对初态输

入 ρ 和末态输出 ρ' 之间的变换，可用一般的量子态映射变换式 $\rho' = E(\rho)$ 表示，其中映射 E 叫做量子运算（操作）. 对上述三种变化进行量子运算 E 的形式分别为：

(1) 幺正动力学演化：

$$\rho'(t) = E(\rho(0)) = \hat{U}^{+}(t)\,\rho(0)\,\hat{U}(t).$$

(2) 量子测量：

$$\rho_m = E_m(\rho) = M_m \rho M_m{}^{+};$$

对投影性测量：

$$\rho_m = E_m(\rho) = |m\rangle\langle m|\rho.$$

(3) 量子耗散动力学演化：

$$\rho(t, S) = E[t, \rho(0, S)] = T\exp\left(\int_0^t \hat{\Gamma}(\tau)\,d\tau\right)\rho(0, S).$$

7.5.2.2 量子运算（操作）的三种等价形式

(1) 系统 + 环境的开放量子动力学形式（消去环境）：

$$E(\rho(S)) = \mathrm{tr}_E[\hat{U}(E,S)(\rho(S)\otimes\rho(E))\hat{U}^{+}(E,S)]. \tag{7-6}$$

(2) 算子求和表示：设环境本征态为 $|e_k\rangle$，$\rho(E) = |e_0\rangle\langle e_0|$.

$$\begin{cases} E(\rho(S)) = \sum\limits_k \langle e_k(E)|\hat{U}(E,S)(\rho(S)\otimes|e_0(E)\rangle\langle e_0(E)|)\hat{U}^{+}|e_k(E)\rangle \\ \qquad\qquad = \sum\limits_k E_k(S)\rho(S)E_k{}^{+}(S), \\ E_k(S) = \langle e_k(E)|\hat{U}(E,S)|e_0(E)\rangle. \end{cases} \tag{7-7}$$

(7-7) 式是 (7-6) 式当环境处态为基态时，按环境本征解分解的结果.

(3) 公理化表示：

① $\mathrm{tr}E(\rho)$ 是过程 E 出现的几率：

$$0 \leqslant \mathrm{tr}E(\rho) \leqslant 1;$$

② E 是凸线性映射（convex - linear map)：

$$E\sum_i p_i\rho_i = \sum_i p_i E(\rho_i);$$

③ E 是完全正定映射（completely positive map).

7.5.2.3 评注

(1) 量子运算本质上是动力学演化产生的变换，本节只讨论了它的数学描

述和运动学方面的性质，其中最重要的是如何从物理的动力学方面给出其具体表示.

(2) 幺正动力学变化和耗散动力学变化都是连续的，这里的量子运算描述的是演化算子的长期渐进行为：量子运算 = 演化算子（$t=0\to\infty$）（很像 S 矩阵与 $U(-\infty, +\infty)$ 算子之间的关系）.

(3) 量子运算的物理内容与物理确定：对于量子测量引起的量子态的变化，由测量确定的物理量所对应的向 Hilbert 子空间（可以是整体的或部分的）投影的算子决定；对幺正动力学和耗散动力学引起的量子态的变化，由演化算子的渐进式决定.

7.5.2.4　其他问题

(1) 正定算符值测度（Positive Operator Valued Measure，POVM）：

①量子测量假定：对量子态 $|\psi\rangle$ 的测量由一组测量算符 $\{M_m\}$ 描述，测量输出的结果为 m 的几率为

$$p(m)=\langle\psi|M_m^+M_m|\psi\rangle.$$

测量后的状态为

$$M_m|\psi\rangle/\sqrt{p(m)}.$$

测量算符 $\{M_m\}$ 满足完闭性条件：

$$\sum_m M_m^+M_m=I,$$

与几率守恒条件（对任意 ψ）：

$$\sum_m p(m)=\sum_m\langle\psi|M_m^+M_m|\psi\rangle=1.$$

测量算符 $\{M_m\}$ 是量子力学观测理论的推广. 设

$$M_m=\frac{\langle m|\hat{O}}{\langle m|\hat{O}|m\rangle},\quad M_m^+=\frac{\hat{O}^+|m\rangle}{\langle m|\hat{O}^+|m\rangle}.$$

若

$$\hat{O}|m\rangle=O_m|m\rangle,\quad \hat{O}^+=\hat{O},\ \langle m|n\rangle=\delta_{mn},\ \sum_m|m\rangle\langle m|=I,$$

则

$$M_m=\langle m|,\qquad M_m^+=|m\rangle,$$

$$\sum_m M_m^+M_m=\sum_m|m\rangle\langle m|=I.$$

②POVM：定义 POVM 元素

$$E_m = M_m^+ M_m.$$

显然，完备性条件$\sum_m E_m = I$和正定性条件$\langle\psi|E_m|\psi\rangle = p(m) \geqslant 0$都满足.

如果

$$\hat{O}|m\rangle = O_m|m\rangle,\ \hat{O}^+ = \hat{O},\ \langle m|n\rangle = \delta_{mn},\ \sum_m |m\rangle\langle m| = I.$$

则

$$E_m = M_m^+ M_m = |m\rangle\langle m|$$

是投影算子.

(2) POVM 的特点：

①POVM 只关心一次测量.

E_m 可以是非归一，非正交的投影，例如：

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{1+\sqrt{2}}|1\rangle\langle 1|,$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{1+\sqrt{2}}\frac{(|0\rangle - |1\rangle)(\langle 0| - \langle 1|)}{2},$$

$$E_3 = I - E_1 - E_2.$$

②POVM 是量子力学观测理论的推广.

③POVM 是从整体测量到局域测量.

④POVM 是从正交归一投影测量推广到非正交非归一投影测量.

7.6 量子计算

7.6.1 量子计算与经典计算

7.6.1.1 计算与物理

计算机是物理系统，计算过程是物理过程.

(1) 任何计算机都是物理系统.

经典计算机是经典物理系统，量子计算机是量子力学系统.

经典计算机信息的存储与加工是基于经典态，量子计算机信息的存储与加工是基于量子态.

量子态不同于经典态的突出特点是：量子态之间的相干和多量子位的纠

缠，使得量子计算不同于经典计算.

(2) 计算过程是计算机这一物理系统执行的一个物理过程.

计算过程可归结为：制备物理态（输入初始数据），演化物理态（执行计算），对最后的物理态实施测量（输出计算结果）.

经典计算是基于经典物理过程，量子计算是基于量子物理过程.

7.6.1.2 量子计算概念的起源

(1) 1982 年，R. Feynman 指出经典计算机模拟量子过程的困难（200 个量子位，需记录 $2^{200}-1$ 个复数）. 他推测按量子力学规律运行的计算机将能克服这一困难. 这是最早的有关量子计算机的设想.

(2) 1985 年，D. Deutsch 论证了量子计算机的有效性，定义了量子图灵机，建立了量子计算机模型.

(3) 1985 年至 1993 年，对量子计算和量子计算机原理的研究取得较大进展.

(4) 1994 年，P. Shor 发现了第一个有重要应用前景的量子算法（大数质因子分解）. 1996 年，L. K. Grover 发现对未整理数据库进行搜索的迭代算法，解决了经典计算中的难题，推动了量子计算机的研究热潮.

7.6.1.3 算法的复杂性

量子计算机的优点在于能解决一些经典计算中难于解决的复杂问题.

算法 求解一类问题的指令系列的集合叫做算法，如算数和代数运算法则（加，减，乘，除，乘方，开方等）.

算法复杂性 是衡量算法难易程度的尺度. 设问题的输入信息量为 n（如 n bits），解决这一问题所需时间为 $T(n)$，若 $T(n)$ 是 n 的多项式，则此算法为多项式算法（有效算法）；若 $T(n)$ 是 n 的指数函数，则此算法为指数算法（无效算法）.

7.6.1.4 P 和 NP 类问题

许多计算问题可转化为“是”与“非”的判定问题.

P 问题：该问题的判定问题可用多项式算法求解.

NP 问题：该问题的判定问题尚未找到多项式算法求解.

NP 问题的例子：

（1）推销员问题：通过 N 个城市的最小路径问题.

（2）大数质因子分解问题.

（3）Hamilton 环路问题：找出连接 N 个城市的一条环路，每个城市只经过一次.

（4）地图四色问题：证明制作地图至少需要四种不同的颜色才能把不同的国家或地区分开.

7.6.1.5　量子计算的优越性

量子计算在以下方面超过了经典计算：

（1）指数加速：Shor 算法把大数质因子分解的 NP 问题化为 P 问题.

（2）非指数加速：Grover 算法把数据库搜索 N 步问题化为 $\sqrt{N}$ 步问题.

（3）"量子黑盒子"指数加速：量子黑盒子是完成某种计算任务的一系列幺正变换，具有把指数算法变为多项式算法的能力.

7.6.2　几种量子算法

（1）量子黑盒子加速算法：把 n 位 Deutsch - Jozsa 黑盒子功能函数的判定从 $2^{n-1}+1$ 次运算变为 1 次运算.

（2）Grover 算法：把未整理数据库搜索从 N 步问题转化为 $\sqrt{N}$ 步问题.

（3）Shor 算法：把大数质因子分解的指数复杂性的 NP 问题转化为多项式复杂性的 P 问题.

7.6.3　量子纠错

量子信息的存储、加工和传输都依赖于量子位之间的相干和纠缠. 无论量子通讯还是量子计算，都必须通过物理的量子系统来实现. 任何量子系统都会受到环境的干扰，使量子位之间的相干和纠缠遭到破坏，使量子信息在存储、加工和传输中产生错误. 必须发展量子纠错方法和技术，才能保证量子信息的准确性.

在经典纠错的基础上，已经发展出量子纠错的方案.

为了减少量子出错的几率，应当提高量子信息存储、加工和传输的稳定性与抗干扰性，尽量减小环境的退相干效应.

7.7 量子计算的物理实现——量子计算机

把数量信息编码在量子态上，利用量子动力学演化和量子态相干与量子态纠缠等物理特性进行数量信息的加工处理，从而实现大规模的平行运算，这是量子计算机的特点.

7.7.1 量子计算机模型

7.7.1.1 量子计算机模型

目前已提出三种量子计算机模型，即量子图灵机模型，量子门组网络模型，量子细胞自动机模型.

1993 年，Yao 证明：量子图灵机可用多项式大小的量子门组网络或量子门组网络多项式大小的时间花费来模拟．这表明，量子图灵机可用量子门组网络来实现.

量子门组网络模型是经典计算机门组网络模型的量子推广，目前已成为研究的重点.

7.7.1.2 经典计算机逻辑门组网络结构与计算机结构

任何合理的计算都是逻辑推理，可以用布尔代数表达式来表示；而任何布尔表达式都可以用简单的“通用逻辑门组”（AND 门，OR 门，NOT 门）构成的适当的电路，或由触发器和门电路组成的具有记忆功能的时序逻辑电路来实现.

(1) 经典计算机运算器的组成：通用逻辑门组 + 两个非标准操作 + 存储器.

①“通用逻辑门组”可由下述方式之一构成：

(i) AND 门 + NOT 门；

(ii) OR 门 + NOT 门；

(iii) 控制 - 非门（C - NOT） + AND 门.

②两个非标准操作：

(i) 拷贝操作：复制一个输入位到两个输出位；

(ii) 清除操作：清除输入位的信息，使其回到初始标准态.

(2) 控制器：控制运算器的运行，由时序电路和逻辑电路组成.

(3) 中央处理器（CPU)：控制器 + 运算器.

(4) 经典计算机的组成：输入设备 + 存储器 + 中央处理器（CPU） + 输出设备.

量子计算机不同于经典计算机的特点：

(1) 用多位量子态编码和存储信息.

(2) 用量子力学的幺正的时间演化算子进行信息的加工和传输，运算过程是可逆的.

(3) 多位量子态的相干和纠缠使量子计算成为大规模的平行运算.

表 7-1　几个经典逻辑门的真值表

x	y	AND	OR	NOT（y）	C-NOT
0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	1
1	0	0	1	1	1
1	1	1	1	0	0

7.7.1.3　经典可逆计算和经典通用逻辑门

(1) 经典 AND 门和 NOT 门是两位输入对应一位输出的运算，因而是不可逆的. 这就带来两个问题：①造成执行这两个门操作的物理系统能量的耗散. 在理论上，20 世纪 60 年代的 Landauer 定理证明，信息的擦除必然伴随热量的耗散. ②不便于推广到量子情况.

(2) 为了克服上述困难，70 年代 Bennett 等人证明：差不多所有的经典计算操作都可以可逆的方式进行，而且可以做到在物理上也是可逆的，不伴随信息的擦除和能量的耗散.

(3) 为了进行可逆计算，必须把通用逻辑门变成可逆的. Toffoli 证明了三位可逆通用逻辑门的存在（Toffoli 门). Bennett 证明，上述通用门可以做到物理上可逆（可消除发热垃圾).

7.7.1.4　通用量子逻辑门

(1) 一位转动门：

$$U\ (\alpha,\ \beta,\ \gamma,\ \delta)\ = e^{i\alpha}\begin{bmatrix} e^{-i(\beta+\delta)/2}\cos\frac{\gamma}{2} & -e^{-i(\beta-\delta)/2}\sin\frac{\gamma}{2} \\ e^{i(\beta-\delta)/2}\sin\frac{\gamma}{2} & e^{i(\beta+\delta)/2}\cos\frac{\gamma}{2} \end{bmatrix}.$$

由此得特殊的逻辑门：

$$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{U}(0,0,0,0),\boldsymbol{X}=\boldsymbol{U}(-\frac{\pi}{2},\pi,\pi,0),\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{U}(\frac{\pi}{2},\pi,\pi,\pi).$$

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{U}\ (\frac{\pi}{2},\ \pi,\ 0,\ 0),\ \boldsymbol{H}=\boldsymbol{U}\ (\frac{\pi}{2},\ 0,\ \frac{\pi}{2},\ \frac{\pi}{2}).$$

(2) 量子通用逻辑门——Deutsch 门是三位 Toffoli 门的量子推广，仅当前两位是$|1\rangle$时，才对第三位加 1.

Deutsch 证明，n 个量子位的 Hilbert 空间的所有幺正变换，其计算网络都可以由这个门的重复使用构造出来.

Barenco 等人证明，量子通用逻辑门可由经典 C - NOT 门和 1 位量子门构成.

7.7.1.5 量子计算机逻辑门网络模型

一个算法既可以通过程序实现，也可以通过线路网络实现. 因此，量子计算可以按两种方式进行：

(1) 把信息编码在 n 个量子位构成的 2^n 维 Hilbert 空间的量子态上，用算法程序控制的幺正变换去演化这一量子态以实现量子计算，所得的演化后的量子态荷载着计算结果的信息. 在这种运行中，量子位是静止的，幺正演化算法是运动的.

(2) 把信息编码在 n 个量子位构成的 2^n 维 Hilbert 空间的量子态上，让这些量子位飞行通过按算法设计的线路网络，从而实现量子计算. 在这种运行中，量子位是运动的，算法网络是静止的. 这种运行模式就是量子计算机逻辑门的网络模型.

量子计算机的逻辑门网络是量子计算机的量子中央处理器（量子 CPU），此外，还需要输入和输出设备才能构成量子计算机：

量子计算机 = 量子输入设备 + 量子 CPU + 量子输出设备.

量子计算机的输入设备是，在存储器中制备荷载初始信息的初始量子态.

量子计算机的输出设备由测量仪器组成，通过对计算末态量子态的测量给出计算结果的信息.

7.7.2 量子计算机的物理实现

7.7.2.1 离子阱方案

1995 年，由 J. I. Cirac 和 P. Zoller 提出离子阱方案．该方案是把 n 个二能级原子（离子）放在离子阱中，沿阱轴排列，对离子的操作由很细的激光束来实现，控制激光频率和脉冲持续时间，可实现单个量子位的转动．联合几个量子位的操作，可实现量子门的操作，如控制 - 非门操作；再和一位门操作联合，可实现离子阱计算机的一套通用门．

这一方案的关键之处是冷却离子阱到 μK ~ nK，并用高真空隔离原子．

7.7.2.2 腔场量子电动力学方案

1995 年，由 A. Barenco 和 T. Sleator 提出腔场量子电动力学方案．该方案是把 n 个二能级原子（离子）放在微腔中，用微腔中的辐射场与原子相互作用来控制原子，实现量子通用门操作．

7.7.2.3 量子点方案

该方案是在半导体中嵌入若干量子点，放入带自旋粒子，通过磁偶极作用实现量子逻辑门操作；或把电子放入这些量子点，通过库仑相互作用实现量子逻辑门操作．

7.7.2.4 核磁共振方案

该方案是把晶格上自旋为 1/2 的原子核的磁矩作为量子位，用核磁共振方法控制磁子的量子态，实现量子逻辑门操作．

7.7.3 量子计算机的实现

实现量子计算机面临许多困难，主要可从以下两个方面着手解决：

（1）克服环境造成的退相干：①采用低温冷却技术和高真空隔离技术以减小环境的影响；②建造抗干扰量子位和逻辑门，如用几何相位建造量子逻辑门，建造团簇或集体量子位；③当环境造成量子位和量子计算出错时，可发展有效的量子纠错方案．

（2）量子位的集成：把量子位、量子逻辑门、量子 CPU 等量子计算机元

件集成起来，使其小型化.

7.7.4　对量子通讯和量子计算机的展望

(1) 量子通讯已经实现，今后的任务是做到长距离、大容量、高效率、低成本和普及.

(2) 量子密码和经典密码的破译在不远的将来有望实现.

(3) 量子计算机的实现仍需时日.

【参考文献】

1　张礼. 近代物理学进展. 北京：清华大学出版社，1997
2　张礼，葛墨林. 量子力学的前沿问题. 北京：清华大学出版社，2000
3　曾谨言. 量子力学前沿问题（第一辑）. 北京：科学出版社，2000
4　李承祖，黄明球，陈平行等. 量子通讯与量子计算. 长沙：国防科技大学出版社，2000
5　戴葵，宋辉，刘芸等. 量子信息技术引论. 长沙：国防科技大学出版社，2001
6　M.A.Nielsen & I.L.Chuang. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2000
7　王顺金. 高等量子论与量子多体理论. 成都：四川大学出版社，2004

第 8 章　生物物理学

8.1　生物物理学的产生与发展

生物物理学是生物学与物理学交叉产生的新兴学科. 物理学的理论和实验方法与技术运用于生物学研究，使生物学研究深入到分子、原子层次，生物学正逐步成为定量的、精密的科学.

8.1.1　生物物理学

生物物理学是研究生命物质的物理性质、生命过程的物理和物理化学规律，以及物理因素对生物系统的作用的科学，是物理学与生物学相结合而产生的交叉学科.

8.1.2　生物物理学的产生与发展

8.1.2.1　早期的生物物理学

从 17 世纪开始，人们就开展了生物物理现象的研究，直到 20 世纪 40 年代 Schrodinger 在都柏林大学关于《生命是什么?》的讲演以前，可以算是生物物理学发展的早期，这一期间生物物理学发展中的重要事件有：17 世纪，Kircher 研究生物发光现象；Borrelli 研究血液循环和鸟的飞行. 18 世纪，Galvani 研究青蛙生物电. 19 世纪，Mayer 研究生理过程的能量守恒.

8.1.2.2　生物物理学的诞生

20 世纪 40 年代，Schrodinger 关于《生命是什么?》的讲演被认为是现代生物物理学的开端. 他指出，生物体是非平衡开放系，负熵导致生命有序，遗传物质的分子基础是非周期性大分子，生命现象与量子论是协调的.

20 世纪 50 年代，物理学实验和理论的发展为生物物理学的诞生提供了实验技术和理论方法. 用 X 射线晶体衍射技术对核酸和蛋白质空间结构的研究

开创了分子生物学的新纪元，把生物学推进到分子水平，为生物物理学的诞生创造了生物学条件．此外，信息论、控制论、计算机科学技术、非线性科学的发展，还为生物物理学的发展提供了数学工具和信息论基础．

8.1.2.3 生物物理学的发展

20世纪50年代以来，生物物理学迅猛发展，已成为一个内容丰富的新兴学科．生物物理学的世界性学会的发展如下：

1956年，美国成立生物物理学会．

1961年，国际纯粹与应用生物物理学联合会（IUPAB）成立，其成员包括40多个国家和地区的生物物理学会，每3年召开一次大会．

中国1958年成立中科院生物物理学研究所，1982年加入IUPAB．

8.1.3 生物物理学的主要研究内容

生物物理学主要研究以下内容：分子生物物理学，膜与细胞生物物理学，感官与神经生物物理学，生物控制论与生物信息论，理论生物物理学，光生物物理学，自由基与环境辐射的生物物理学，生物力学与生物流变学，生物物理学技术．

8.1.4 生物物理学发展的主要特征

（1）分子生物物理学是整个生物物理学的基础，也是当前研究的重点，占主导地位（占1/3）．

（2）膜与细胞生物物理学是把分子生物物理学的原理与方法运用到生物活体系的第一个目标，即用分子的语言描述膜与细胞的结构与功能（占1/3）．

（3）开展动态的、活体的检测与研究，发展相关检测技术．

（4）对更高的复杂层次的研究，如对视觉、脑和神经活动的研究．

8.1.5 必要知识

8.1.5.1 生命的化学元素

（1）六种主要元素：^{1}H，^{6}C，^{7}N，^{8}O，^{15}P，^{16}S，其分布如下：

碳水化合物、类脂化合物：H，C，O；

蛋白质：H，C，O，N，S；

核酸：H，C，O，N，P（P 用于传输能量）.

（2）四种少量元素：^{20}Ca，^{19}K，^{11}Na，^{12}Mg（0.1% ~ 2%），用于肌肉内的调节以及神经冲动.

（3）六种微量离子（〈0.01%）：Fe，Cu，Zn，Co，Mn，Mo. 它们是酶的激活剂以及配合物的成分.

8.1.5.2　支配生物过程的相互作用

支配生物过程的相互作用是电磁相互作用，特别是静电库仑力起主要作用.

8.1.5.3　两种重要的生物大分子

（1）蛋白质：地球上的 150 万种生物有 10^{10} ~ 10^{12} 种蛋白质；蛋白质的分子量为 10^4 ~ 10^7；蛋白质是细胞的主要成分（占 20% 湿量）；蛋白质有五种功能，即酶、抗体、结构成分、运输工具、代谢调节者；蛋白质由 20 种氨基酸组成，氨基酸分子量约为 100，氨基酸的分子结构为：

$$\begin{array}{c} \mathrm{H} \\ | \\ \mathrm{NH_2{-}C{-}COOH} \\ | \\ \mathrm{R} \end{array}, \qquad \begin{array}{ccccccc} \mathrm{H} & & \mathrm{H} & & \mathrm{O} & & \\ & \diagdown & | & & \| & & \\ \mathrm{H}{-} & \mathrm{N} & {-}\mathrm{C}{-} & & \mathrm{C} & {-}\mathrm{OH} & \\ & & | & & & & \\ & & \mathrm{R} & & & & \end{array}$$

肽链：两个氨基酸分子相连，脱去一个水分子（H_2O）形成肽链.

蛋白质与多肽：分子量大于 100（1000）的肽链叫做蛋白质，小的叫多肽.

氨基酸分子按螺旋性可分为：

①L 氨基酸或左旋氨基酸．L 氨基酸的分子结构为：

$$\begin{array}{c} \mathrm{COO^-} \\ | \\ \mathrm{H_3N{-}C^{\alpha}{-}H} \\ | \\ \mathrm{R} \end{array}$$

②D 氨基酸或右旋氨基酸．D 氨基酸的分子结构为：

$$\begin{array}{c} \mathrm{COO^-} \\ | \\ \mathrm{H{-}C^{\alpha}{-}NH_3} \\ | \\ \mathrm{R} \end{array}$$

所有蛋白质的氨基酸都是左旋的.

(2) 核酸：核酸有两种，即脱氧核糖核酸（胸腺核酸 DNA）和核糖核酸（酵母核酸 RNA）.

两种核酸的差别是：前者五碳核糖环（五角环结构）的第二位少一个氧．分子量为 6×10^6.

核酸由几百到几千个核苷酸组成.

核苷酸的分子量约为 1000，包含一个五碳糖，一个碱基和一个磷酸根，通过磷酸二酯键连接成核酸.

碱基有四种：

对 DNA 为 A（腺嘌呤），G（鸟嘌呤），C（胞嘧啶）和 T（胸腺嘧啶）；

对 RNA 为 A，G，C，U（尿嘧啶）.

核酸的结构与功能：①RNA 是单链，其三种功能是：作为 DNA 副本的 mRNA，作为 mRNA 和特定氨基酸间接合作体的 tRNA，作为生产氨基酸工厂的 rRNA．②DNA 是双链螺旋结构（Watson & Crick 1953），由碱基氢键配对连接；配对规则是 G－C 间三个氢键，A－T 间两个氢键．它的功能是储存遗传密码，自我复制.

转录与翻译：以 DNA 为模板合成 RNA 叫做转录，以 RNA 为模板合成蛋白质叫做翻译．DNA 通过 RNA 把遗传信息传递给蛋白质分子.

8.2 生物物理学的主要研究内容

8.2.1 分子生物物理学

分子生物物理学运用物理学理论方法和实验技术研究生物大分子和小分子，分子聚集体的结构，相互作用和动力学，以及生物分子的生物学性质在生物功能过程中的变化，从分子层次上用物理学规律阐明生命的基本过程.

分子生物物理学研究的核心问题是：生物分子的时空结构与功能的关系.

8.2.1.1 生物分子结构研究经历的三个阶段

(1) 生物大分子晶体结构的分析研究：手段是 X 射线衍射分析．截至 1993 年 6 月，已存入国际数据库的生物大分子结构数据有 1101 个，其中蛋白质 982 个，核酸 109 个，多糖 10 个.

(2) 生物大分子溶液构象的研究：研究对象接近活体真实状态，手段是光

谱、波谱、核磁共振．目前已测得 20 种蛋白质和 20 种多肽的构象，但对分子量大于 1.5 万的生物大分子的测量仍有困难．

(3) 动态结构的分子动力学研究：用时间分辨技术和分子动力学理论研究分子的动态结构与功能的关系．

8.2.1.2 分子生物物理学的重点问题

分子生物物理学重点研究分子识别与蛋白质折叠．

(1) 分子识别的研究．生物分子的识别具有普遍意义：DNA 的复制与转录，蛋白质的转译，酶与底物的作用，激素与受体、抗原与抗体的作用，都基于生物分子的识别，即分子之间的特异相互作用或相互作用的专一性．其识别机制仍未弄清．

(2) 蛋白质折叠的研究．蛋白质如何由多肽链折叠成具有一定空间结构的信息，是尚未解决的基本问题，包括：蛋白质折叠的热力学和动力学控制，辨识折叠过程中出现的中间体以了解折叠全过程，对促进或催化折叠的物质（称为分子伴侣）进行研究，折叠的启动等．需要在生物体内进行折叠过程的研究．

8.2.2 膜与细胞生物物理学

细胞是生命的基本单元．目前，对细胞结构与功能的研究多集中于细胞内的各种膜（细胞质膜、内质网膜、线粒体膜、核膜，统称为生物膜），包括繁殖、分化，对刺激的反应等宏观研究和分子水平的微观研究，但以微观研究为主．

8.2.2.1 膜的分子动力学和膜的物理性质之间的关系的研究

膜脂具有旋转、侧向扩散、翻转、链内链外的多种运动；膜蛋白只有旋转和扩散运动．运动的时间尺度很大，在 10^{-15}s ~ 10^{3}s 范围内．

重要结论：

(1) 膜具有动态结构，许多因素会影响这种结构；

(2) 动态结构导致一定的物理性质，如流动性；

(3) 细胞在一定范围内（温度，pH 值等）具有自我调节流动性的能力；

(4) 流动性异常与多种疾病有关．

8.2.2.2 膜脂结构多型性的生物学意义的研究

一般膜脂在水化后形成双层，成为细胞内外的屏障．有些膜脂水化后形成六角形、立方体形等多种非双层结构，说明除屏障功能外，膜脂还有其他生物学功能．

膜脂分子链长的不对称性可以形成交叉双层结构，改变膜的厚度、疏水性、表面物理性质，从而影响膜蛋白的生理功能．

8.2.2.3 膜脂与膜蛋白相互作用的研究

蛋白质发生跨膜定向运动与输运时，膜脂可能由双层结构（内层亲水，外层疏水）变为非双层结构；而蛋白质有一个折叠、解折叠过程．对这一现象可采用人工膜模拟研究．

8.2.2.4 膜的物质传输通道的研究

生物膜离子通道有选择性，使细胞维持一定的电位，诱发可兴奋细胞产生动作电位，在非兴奋细胞中调节激素的分泌过程，控制生殖细胞的受精过程，控制免疫细胞的运动与吞噬等．通道的研究包括：

(1) 通道蛋白质空间结构的研究；

(2) 通道功能性结构的分子模型和启闭原理的研究；

(3) 通道活化的分子机制：配位体门控和电压门控的研究．

8.2.2.5 膜的信息传递——受体的研究

配体与膜上受体特异作用（识别）后，把信息传到膜内，引起细胞内一系列反应，使细胞发生变化．

配体是代谢物，包括激素、抗体、离子、光子、药物、毒素等．

受体的研究包括：

(1) 配体与膜上受体特异作用（识别）研究；

(2) 膜内信息的传导——G 蛋白（受体与酶偶联的功能蛋白，起调节作用）作用机制研究；

(3) 信号传输的研究．

三要素（受体、G 蛋白、效应器——酶）中，在分子水平上了解效应器最少．

8.2.2.6 膜的能量转换机制的研究

生物体与环境的能量交换在膜上进行，有两套与能量代谢有关的酶系统：ATP 酶和电子传递链．ATP 酶催化 ATP 的合成，是需能反应；电子传递链有两类：线粒体和呼吸细胞中的呼吸链，光合细胞中的光合链（有序排列的电子传递体，释放能量供 ATP 合成需要）．该项研究包括：

(1) 电子传递链的结构与功能；
(2) ATP 酶的结构与功能；
(3) 电子传递链与 ATP 酶功能的关联．

8.2.2.7 细胞生物物理学

细胞生物物理学的研究对象包括：细胞的整体功能，细胞内浆体的运动，细胞的淌动，细胞间的黏着、连接、相互影响，细胞内蛋白质的输运与筛选，外力场对细胞的影响等．

8.2.3 感官与神经生物物理学

感官与神经生物物理学研究：

(1) 人和动物是如何感知周围世界；
(2) 脑如何储存、加工、利用信息；
(3) 脑如何计划并采取对外界的行动；
(4) 人怎样学习过去的经验并改变自己的行动；
(5) 人如何专心一种感觉而排除其他感觉；
(6) 人如何思维、判断和决策．

上述研究在神经生物物理学、神经医学和计算机科学中都有重要意义．

这一领域研究的重要问题包括：

(1) 离子通道的研究：电信号通过离子在神经细胞内外的运动来实现，离子通道控制电信号的传递．离子通道包括电压门通道，化学门通道和受体通道．

(2) 感受器生物物理：感受器的功能是，把从环境接受到的（能量）信息变换、编码成神经系统可以传输、加工的电信号．感受器包括视觉感受器、听觉感受器、嗅觉感受器、触觉感受器等．

(3) 神经递质及受体：神经递质是神经活动的物质，神经受体是上述物质

的接受体.

(4) 神经通路和神经回路：神经通路和神经回路是神经元之间的相互联系. 目前正在研究视觉通路与回路，听觉通路，嗅觉通路，学习记忆的神经和分子基础，神经通路和神经回路等问题.

(5) 行为神经学：研究行为的释放与调控机制.

8.2.4 生物控制论与生物信息论

这一领域的奠基者和大家有：Wiener，McCulloch，Pitts，Rosenblatt，Esby，Harmon，Hopfield，Prigogine，Haken 等.

(1) 生物系统的辨识：指根据生物调节系统的结构与功能，简化并建立模型，对生物系统的活动进行预测. 例如，药物代谢动力学，示踪动力学，呼吸动力学，血液循环动力学等.

(2) 神经网络的研究. 这一领域的前沿课题有：①人工神经网络和生物神经网络的联合研究；②生理功能系统，代谢调节系统，运动控制系统的建模；③免疫调节系统的研究；④基因调节系统的研究.

(3) 生物信息论：将在本章 8.4 节中介绍.

8.2.5 理论生物物理学

理论生物物理学是指用理论物理和数理方法研究生命现象，包括量子生物学和分子动力学等微观研究，也包括进化、遗传，生命起源，脑的功能活动以及生物系统的复杂性等宏观研究.

在理论生物物理学的发展史上，重要的进展有：20 世纪 20 年代，Volterra 创立种群生态学；30 年代，Fisher 创立群体遗传学；40 年代，Shroedinger 创立生命的本质论，Bertalanty 创立生命系统论；60 ~ 70 年代，Prigogine 创立生命耗散结构理论；70 ~ 80 年代，Haken 创立生命协同学.

下面介绍理论生物物理学重要的研究方向.

8.2.5.1 生命起源与生物分子手征性

针对生物分子具有一定的手征性，研究这种手征性的起源以及生物分子自复制的起源；针对无机物变有机物，研究有机物如何产生蛋白质，并进一步产生生命；针对生命系统的主要分子或大多数生物物质分子（如 DNA）都是单一手征的，也即生物分子手征性发生了破缺，研究生物分子手征性破缺与物理

学和宇宙学中对称性破缺的联系．

8.2.5.2 进化和遗传的物理基础

(1) 生命系统不同于物理自组织系统的原因有两点：对环境的适应性和自我复制能力．

(2) 自适应和自复制是进化和遗传的基础：通过自适应，环境的信息进入生物系统；自复制在短时间尺度上表现为对信息的记忆，在长时间尺度上表现为遗传．

(3) 在环境变化的背景中，通过自适应和自复制过程而实现的遗传，加之环境的严酷选择，就导致进化．

(4) 自我复制的机制之一：系统内的信息不断从空间形式的信息转换为时间序列的信息，再由时间序列的信息转换成空间形式的信息．由于时间的单向不对称性和空间的对称性，时空信息在转换过程中必然存在不对称环节，这个环节很可能是不对称的光学活性分子．

(5) 遗传的物理机制的研究重点：时空信息转换的瞬态过程的稳定性．

(6) 进化的物理机制的研究要点是，进化瞬态过程的稳定和失稳之间的转换——没有稳定就没有遗传，没有失稳就没有变化；进化是变化与遗传的对立统一，是变化中的遗传和遗传中的变化．

8.2.5.3 人脑在有意识时的功能活动

人脑具有作为生理器官的输入输出功能和作为信息处理器的输入输出功能．神经网络中电信号巡回运转，引起生物化学物质分布的变化，再进一步引起神经网络结构的变化．

8.2.5.4 生态环境的稳定与变化的规律

目前，人们正在研究生态系统的物理规律：最小生物圈有多大？地球生物圈有多大的承受能力？

8.2.5.5 量子生物学和生物分子动力学

(1) 量子力学无法处理生物大分子，只能对小的生物分子或大分子片段进行计算．因此，需要用经典力学作为补充，以扩大计算对象．

生物分子的动力学计算，要考虑生物分子间的非线性耦合，这对目前的科

研水平来说，更是严峻的挑战.

（2）X 射线衍射与核磁共振结合是很好的实验手段.

8.2.5.6 生物系统的层次性和复杂性研究

生物系统的层次性和复杂性研究包括有序性、层次性、复杂性、混沌及其相互关系.

（1）瞬态过程中的层次性和复杂性：研究不同时空尺度中的过程.

（2）时空结构的层次性和复杂性：研究不同时空尺度中的结构.

（3）结构与功能的层次性和复杂性：研究不同时空尺度上结构与功能的关系.

（4）结构与过程的层次性和复杂性：研究不同时空尺度上的结构与过程的关联.

（5）非线性动力系统的层次性和复杂性：在不同时空尺度上研究非线性动力学过程.

（6）信息的层次性和复杂性：在不同时空尺度上研究生物信息.

8.2.6 光生物物理学

光生物物理学研究生物学中的光物理和原初光化学过程，其研究重点是光能转换过程. 光能转换的物质基础是吸收光的感受体——生色团或色素蛋白质复合物.

光能转换多在膜上进行.

光对有机体的作用时间如下：光吸收时间为 10^{-15}s；振动弛豫时间为 10^{-12}s；最低单线激发态及荧光产生时间为 10^{-10}s；三重态时间为 10^{-2}s ~ 1s.

光对有机体的作用包括：①紫外线和可见光的作用；②光能转换；③光的触发作用；④生物发光与化学发光.

光生物物理学研究下列问题：

（1）光合作用研究的中心问题：①天线色素的结构（有三种已获得结晶）；②能量转移：从外周天线色素向反应中心转移，所需时间不大于 50ps ~ 100ps；③在反应中心研究光能转换成化学能；④从分子器件研究光合作用：光致电荷分离，分离电荷反应产生电场与产物，且要求单向电荷传递.

（2）视觉：视紫质感光后如何通过光化反应形成有生理活性的信号.

（3）嗜盐菌（含生色团蛋白质复合物——菌紫质）的光能转换（这是新型

的光合作用).

(4) 植物光形态建成：光对植物生长、发育的调节作用，不同于光合作用，它是触发作用，称为光形态建成．光形态建成的控制物质是光敏色素．光敏色素有 Pr 和 Pfr 两种，在不同波长的光的照射下互相转换．它们通过光能转换把环境信息传给细胞，从而控制植物的生长发育．光敏色素还包括对红光敏感的原蓝素（引起避光性）和对蓝光敏感的隐花色素（引起光趋性和光向性，其过程还不清楚).

(5) 光动力学作用：是指在光敏剂和氧的参与下，光照产生的生化效应．光动力学的作用机制有Ⅰ型自由基反应和Ⅱ型单线反应，二者的生化作用不同．光敏剂可作药物，是近年来研究的热点．光动力学作用的基质是核酸、蛋白质、脂质、生物膜等．

光动力学作用的研究成果可应用于光化治疗．

(6) 生物发光与化学发光：生物发光的本质是化学发光，人类对其基本反应已有所了解，但细节尚不清楚．生物发光有两类：①强发光（生物发光)：如萤火虫、细菌、水母发出的光，强度可达10^{10}cd/（$cm^2 \cdot s$)．目前已能通过基因工程人工合成荧（发）光素，发光效率高，有重要的理论与实用意义．②超弱化学发光与微生物发光：其强度可达 100cd/（$cm^2 \cdot s$)．生物体内在酶或非酶生化反应、细胞分裂、DNA 解旋时发光．

基于化学发光的分析法的灵敏度比常规法高出几个数量级．

8.2.7　自由基与环境辐射的生物物理学

在对宇宙线、高能辐射、光和电磁波等辐射对细胞和生物大分子作用的原初过程的作用机制的研究中，自由基的产生及其生化作用是一个重要环节．

8.2.7.1　自由基

自由基是化学活性很强的离子团或原子团，如羟自由基˙OH，过氧化氢（双氧水）H_2O_2 等．它们具有很强的氧化性，对细胞、蛋白质、基因、生物大分子等有损伤作用．自由基的产生和清除的不平衡，会引发疾病，加速衰老．

有关自由基研究的重点问题是：①活性氧自由基和抗氧化剂的研究；②脂类自由基在膜脂过氧化反应中的分子机制的研究．

8.2.7.2 电离辐射的生物物理研究

(1) 辐射物理化学：辐射原初效应按持续时间的长短不同可分为三个阶段：①辐射物理阶段：持续时间为飞秒至皮秒，这是辐射的激发、电离作用阶段；②辐射化学阶段：持续时间为皮秒至微秒，这是水的辐射分解、氧自由基与水合电子的产生阶段；③辐射生化阶段：持续时间为微秒以上，这是自由基对 DNA 等生物分子的氧化还原作用与有害自由基的清除阶段.

辐射致癌与自由基有关，辐射损伤与化学损伤有共同之处.

(2) 辐射生物化学——DNA 亚分子辐射损伤与修复研究：要求把 DNA 的辐射损伤和修复研究推进到 DNA 亚分子的特定功能基因.

(3) DNA 修复与基因治疗研究：从治疗的角度研究 DNA 的损伤与修复.

8.2.7.3 生物磁学与生物电磁学

生物磁学与生物电磁学的研究对象包括：①外界磁场和电磁场对生物机体不同层次（分子、细胞、器官、整体）的作用机制；②生物体自身产生磁场和电磁辐射的机制与特性.

自 1970 年以来，共召开了 7 届国际生物磁学会议. 1978 年，美国成立了生物电磁学会；1989 年，欧洲成立了生物电磁学协会. 1989—1991 年，美国对极低频电磁辐射（50Hz ~ 60Hz）与癌症发病率的关系的研究投入 20 亿美元，目前这一研究已扩大到 12 个国家.

生物磁学与生物电磁学的研究课题目前已有：

(1) 器官水平的生物磁学研究：应用超导量子干涉仪（SQUID），可对心磁、脑磁、肺磁进行精确的定位研究，测量心脏的兴奋过程，神经活动产生的磁场，肺部的尘埃量和肺功能等.

(2) 细胞磁学研究：用微电极和超导磁强计，可记录神经和肌肉纤维的动作电位与动作磁场，测量跨膜电位和细胞内的电流，神经纤维损伤与修复的程度；使巨噬细胞吞入磁探针可测量活细胞浆的黏滞度与流变特性，以及细胞器的运动和物理特性等.

(3) 分子磁化率研究：可采用超导磁化率计测定病人的肝、脾和心脏的铁含量，小容量、低浓度金属蛋白质样品的磁特性等.

(4) 磁场的生物学效应：恒定强磁场（2T）会增加心脏循环时间，8T 的磁场可治疗血栓. 目前各国科学家还在研究人与动物对强磁场的适应性；地磁

（弱磁）对细菌、动物的导航作用；地磁反转与地球上某些生物灭绝的关系等.

脉冲强磁场对上肢神经有刺激作用，脉冲弱磁场对培养细胞的 DNA 合成有减弱作用，对姐妹染色体交换无影响；脉冲磁场可增加离体组织的有机物合成，增进钙化，加速血管增生.

（5）电磁波的生物效应及其机制的研究：指对不同频率、强度、波形和持续时间的电磁波对生物大分子、细胞、器官、个体或群体的生物效应的研究.这类实验很多，但解释不够.

利用微波的听觉效应改变血脑屏障的通透性较有成效. 工业频率电磁波、毫米波和脉冲波是研究重点. 弱脉冲电磁场对 DNA 的合成、神经中枢和眼组织有影响.

以上研究要解决电磁辐射的人体剂量问题.

8.2.8　生物力学与生物流变学

运用力学理论与方法，可研究生物的结构、功能、受力、运动等方面的力学问题，给予生物机体中的力学规律以定量的描述，为生物医学工程和生物技术服务.

（1）生物流体力学：主要研究生物体内的气体和液体的流动规律，包括：肺和血管的流体力学、呼吸力学、细胞流体力学、淋巴流体力学、植物生理流动和生物化学工程流体力学等.

（2）生物固体力学：主要研究骨力学、组织生物力学、关节力学、齿力学、创伤力学、矫形力学、步态力学、运动生物力学、皮肤力学、血管力学等.

（3）生物流变学：该项研究已有 30 多年的历史，研究对象包括：血液流变，血管和器官流变，微循环生物流变，细胞生物流变，分子生物流变，肌肉细胞流变，生长的生物流变，植物的生物流变，临床血液流变等. 其中血液流变学研究占 50%，包括血液流动性和黏性与人体免疫功能的关系，血液流动性和黏性与人体神经 - 内分泌系统的关系，以及其与人体疾病的关系等.

（4）其他生物力学：研究动物的飞行与游泳力学，微生物的运动，听觉和视觉系统的力学结构与特性等.

8.2.9　生物物理学技术

现代生物物理学技术的特点是：

(1) 提高了空间细微结构的分辨率;

(2) 提高了生物过程的时间分辨率;

(3) 活体的无损伤检测技术.

8.2.9.1 空间显微技术

该项技术包括:

光学显微: 显微尺度为几百纳米 (10^{-7}m).

电子显微: 显微尺度为埃 (Å = 10^{-10}m).

共焦显微术 (立体): 激光照射样品一点, 反射到光电倍增管所在的焦平面上, 形成样品的薄层像.

隧道扫描探针显微 (STM): 显微尺度为 0.1Å.

近场 (扫描) 光学显微 (NSOM): 光通过亚微米小孔对样品作近距离扫描, 可突破光镜极限.

分子激发显微: 这是 STM 与 NSOM 的结合, 利用了能量共振.

此外, 还有标记物显微, 其他辐射 (X 射线, 光电子, 超声) 显微等.

8.2.9.2 时间分辨技术

当前对生物物理的研究已进入动态研究领域, 其时间尺度为 10^{-15}s ~ 10^{3}s. 因此, 必须发展相应的时间分辨技术, 包括:

(1) 纳秒 (10^{-9}s) 级光谱技术 (荧光光谱技术): 研究蛋白质构象, 膜结构和膜蛋白结构的动力学.

(2) 皮秒 (10^{-12}s) 级光谱技术: 应用光吸收、荧光、拉曼光和共振拉曼光、圆二色光谱等手段. 脉冲激光用于研究血红蛋白的光解电离、二级结构、四级结构及其变化.

(3) 飞秒 (10^{-15}s) 级光谱技术: 研究能量转移和激发态, 是前沿研究, 还处于初期阶段.

时间分辨技术的发展有以下三个方向: ①产生超短脉冲激光, 提高时间分辨率; ②扩展光谱频率, 增加光谱种类; ③时间分辨和空间分辨结合起来, 可进行活细胞动态分析.

8.2.9.3 神经活动检测技术

该项技术包括:

(1) 利用 SQUID 探测大脑不同部位的神经活动.

(2) 利用电压敏感染料分子与细胞膜结合，把膜电位变化转变为光信号，经显微镜和二维光学检测器再转换为电信号进行处理.

8.2.9.4 计算机与自动化技术

该项技术包括：

(1) 利用计算机进行数据采集、处理、加工和成像.

(2) 生物系统的计算机建模模拟.

(3) 利用计算机控制的机器人进行实验检测.

8.3 生物系统与生态系统：生物系统的层次性与复杂性

8.3.1 生命是非平衡系统的一个过程，而非一种物质状态

可以从下述两点认识生物系统是过程而不是结构或状态，即生物系统是动态过程而非静态或定态结构，是变化的过程而非稳定的状态.

(1) 与处于非平衡态的“耗散结构”系统的类似性：两者与外界环境都有物质、能量、信息的交换，都能形成耗散的自组织结构.

(2) 与“耗散结构”的不同点：生物系统对外部环境的信息有记忆能力，对环境变化有适应性；有自我复制和遗传的能力，而“耗散结构”没有.

8.3.2 生命是一个复杂的瞬态过程

生命是一个发生、发展、消亡的瞬态过程. 这些过程在时空中有很宽的从微观到宏观的时空尺度，因而是发生在不同时空层次上的过程. 它们相互关联、相互影响，形成一个有机整体.

8.3.3 生命有复杂的层次结构

生命的复杂的层次结构包括：分子、蛋白质、细胞器、细胞、组织、器官、个体、群体、生物系统（所有生物群体的集合）、生态系统（=生物系统+生物系统赖以生存的环境）. 这些层次相互关联、相互影响，形成一个有机整体. 必须从这些层次之间的相互关系去研究生命现象的发生、发展和消亡的过程.

地球是迄今发现的宇宙中唯一的，最大的生态系统.

8.4 生物信息学

20世纪90年代诞生的因特网和随之而来的信息高速公路，标志着信息时代的到来. 人类基因组计划的大型国际合作，完成了人类基因组计划的第一步——对30亿对DNA碱基的全序列的测定. 而搞清人类基因组全套遗传密码的全部涵义，则是这一计划的目标. 基因组计划和国际因特网推动了生物信息学的诞生. 计算机在生物学中的广泛应用则为生物信息学的诞生创造了技术条件.

生物信息学的广义涵义是利用信息技术管理和分析生物学数据. 从基因组数据分析的角度看，生物信息学的狭义涵义是指核酸和蛋白质序列数据的计算机处理与分析.

生物信息学的中心任务是从浩如烟海的序列数据中提取理性知识. 为此，不仅要解决高效的数据储存手段，而且要开发有效的数据分析手段，将序列信息转换成生物化学和生理学知识，弄清序列所蕴涵的结构和功能信息，了解它们所代表的生物学意义.

若把蛋白质比做句子，把序列模体比做单词，则蛋白质的基本元素氨基酸就是字母. 生物信息学中蛋白质序列分析的目标，就是掌握这部由蛋白质组成的“天书”中组成各种句子的单词，弄清各种蛋白质的序列模体所代表的生物学意义，以及把单词组合成句子的句法规则.

生物信息学中核酸序列分析的核心课题是从大量的序列信息中获取基因结构、功能和进化等知识.

迅速增长和浩如烟海的蛋白质与基因组序列数据，使生物信息学研究成为只有通过国际合作才能完成的事业，而计算机和因特网的迅猛发展使这项国际合作得以实现和颇具成效，许多著名的生物信息学研究中心和数据库应运而生. 生物信息学研究已成为一项国际性的工作，其进展之快和成就之大是日新月异的. 这一领域的现状和成就请参考本章文献 [4]，[5].

8.5 讨论与展望

作为物理学与生物学交叉的生物物理学还处于幼年时代，而量子生物学则

更处于襁褓期. 这是一个大有作为的领域, 正等待人们, 尤其是青年人去开发. 她将推动生物学的变革, 也将大大推动物理学的发展.

【参考文献】

1 国家自然科学基金委员会. 自然科学发展战略调研报告: 生物物理学. 北京: 科学出版社, 1995

2 郝柏林, 刘寄星. 理论物理与生命科学. 上海: 上海科学技术出版社, 1997

3 甘子钊, 韩汝珊, 张学群. 生命科学中的物理学. 北京: 北京大学出版社, 1996

4 郝柏林, 张淑誉. 生物信息学手册. 上海: 上海科学技术出版社, 2000

5 〔英〕T. K. Attwood, D. J. Parry Smith. 生物信息学概论. 北京: 北京大学出版社, 2002

6 罗辽复. 物理学家看生命. 长沙: 湖南教育出版社, 1994

7 P. Black, G. Drake, L. Jossem 著, 赵凯华等译. 物理 2000: 进入新千年的物理学. 北京: 北京大学出版社, 2000

第 9 章　21 世纪的物理学

9.1　21 世纪物理学面临的变革

21 世纪物理学面临的变革包括物理学的基本理论——粒子物理学和宇宙论在纵深方面的深刻变革和多粒子系统物理学与复杂系统物理学在横向方面的重大进展，以及与物理学有关的交叉学科的兴起和由此而来的新发现.

21 世纪的物理学将通过对高科技的巨大促进，对知识经济和社会生活的各个方面产生重大的影响. 物理学很可能与生命科学、信息科学和航天科技一起分享 21 世纪.

9.1.1　物理学基本理论——粒子物理学和宇宙论在纵深方面的深刻变革

预计物理学基本理论将在微观真空和宇宙背景新性质发现的基础上，建立起与相对论和量子论形成三足鼎立和协调一致格局的第三种基本理论，以实现物理学基本理论的完备性，从而统一地描述物质的基本结构和基本相互作用，解释质量和引力的起源以及相互作用的本质. 与此同时将建立起完善的宇宙学，从微观、宏观和宇观三个方面解释宇宙的起源、天体结构的形成和宇宙的演化与归宿.

9.1.2　多粒子系统物理学和复杂系统物理学在横向方面的重大进展

多粒子系统物理学包括强子和原子核物理学，原子分子物理学与光学，凝聚态物理学等运用物理学基本定律研究多体系统和复杂系统的横向科学.

强子和原子核物理学将全面进入基于 QCD 的多夸克系统动力学时代.

凝聚态物理学将进入对以人造凝聚态、极端条件下的非常规凝聚态和生物凝聚态过程为代表的复杂系统的规律进行研究的时代. 高温超导体的研究和应用，可控热核反应的研究和聚变能的实际利用将是这一领域的中心课题，它将彻底解决人类的能源问题. 人造凝聚态的研究和原子分子的控制与操作，将给

材料科学和化学开辟空前广阔的前景，使人类摆脱大自然的约束，按自己的意愿和需要设计和制造人工智能材料．超强超快激光、光与原子分子相互作用的精确控制，将开辟光学的新时代．物理学将在原子、分子的层次进入生物过程的研究，在生物物理领域形成重要的交叉学科．

9.1.3 交叉学科的兴起与新发现

量子物理的理论及其实验技术与信息科学和计算机科学技术的深层次结合，将在量子信息、量子通讯与量子计算等方面产生重大的理论成果和应用技术，量子通讯将获得重要应用，量子计算将有可能逐步实现．

物理学在原子分子的层次进入生物过程的研究，将使量子生物学能够对生物大分子的能量、电荷输运和信息传递做出定量的描述，对生化过程在原子分子层次上做出说明．量子生物学与生物信息学一起将最终揭示蛋白质序列的生物学涵义和 DNA 序列的遗传秘密．

地球科学与物理学结合将产生许多新兴交叉学科．大气物理与气象物理将使天气预报的有效期延长、准确度大大提高，天气的人工控制和人工气候的规模将增大．海洋物理将揭示新的海洋秘密，特别是深海的秘密和海洋 - 大气相互作用的规律．有关深层地壳物理和地心物理的研究将发现不为人知的规律．所有这些学科的发展，将使我们对自己居住的星球有更为深刻的了解，为我们与地球和谐相处提供科学知识．

9.1.4 物理学对高科技的巨大促进

物理学将通过与生物学、化学、材料科学、信息科学、地球科学以及空间科学的联盟，以比上个世纪更快的速度，更大的规模，更深的层次，促进高科技的发展，并通过高科技对知识经济和人类社会产生巨大的影响．

9.2 物理学的研究方法

物理学的研究方法与物理学的特点密不可分．物理学有几个显著的特点：

(1) 它是精密的、定量的实验科学．为此，物理学研究要采用精确的实验方法和精密的仪器，要有严密的理论方法和严格的数学方法．

(2) 它是探索自然本原的科学．在自然科学中，物理学研究的问题最为基本，它要对一些哲学性的问题作出科学的回答，如物质、运动、时空的本性，

宇宙的起源与演化，等等．

（3）物理学与数学和哲学是紧密结合的．这可以从下面两点看出：

①伟大的物理学家都是自然哲学家，最突出的例子有牛顿、爱因斯坦、N·玻尔等．

物理学需要科学的哲学．科学的哲学是从科学成就和人类社会实践中总结出来的哲学，它的思想方法是受科学实践检验的，而不是凌驾于科学之上的、“不可侵犯”的．科学的哲学是发展的，而不是一成不变的．

从自然科学的发展经验来看，可信的自然科学的哲学是唯物论、辩证法．这一哲学有多家之言，许多现代哲学派别的观点有可取之处．

②没有近代和现代数学，就没有现代物理学．物理学与数学密切对应说明了这一点（见表 9－1）．

表 9－1　物理学与数学的对应

物理学	数　学
经典力学	微积分
狭义相对论	闵式几何
广义相对论	黎曼几何
电动力学	偏微分方程
量子力学	希伯特空间理论
量子场论	泛函积分理论
规范场理论	纤维丛理论
对称性理论与守恒定律	群论

因此，有作为的现代物理学家应掌握必需的现代数学与科学哲学知识．

9.3　21 世纪的中国物理学

9.3.1　21 世纪中国物理学（中期）前景的预期（部分）

（1）中国经济和高科技的快速发展将带动凝聚态物理学、原子分子物理学和光学的快速发展，较快地缩小与国际研究前沿的差距，并先在某些主流领域占有一席之地，然后再逐步扩大．

（2）原子核物理学：在重离子核物理学、超重核合成和放射性核研究方

面，可望占领一席之地，在理论研究方面可望做出有中国特色的东西.

(3) 基本粒子物理学：在实验的国际合作方面可望做出中国人的贡献，在正负电子对撞机的实验研究和粒子物理理论研究方面可望做出有中国特色的东西.

(4) 天体物理学与宇宙学研究的差距将会缩小，在天体观测和宇宙学理论研究方面可望做出成绩.

(5) 交叉学科：生物物理学在分子遗传学和生物信息学方面可望做出成绩. 量子信息、量子通讯和量子计算研究的技术差距将会缩小，理论研究可望做出成绩.

9.3.2　中国发展物理学的策略

(1) 国家资助策略：我国由于财力资源有限，资助要突出重点，要"有所为，有所不为".

(2) 个人自由研究：中国有 13 亿人口，凡是有意义的、世界上有的学科，我们都要有人研究，特别是基础性理论研究.

9.3.3　21 世纪中国物理学家的责任

21 世纪,中国物理学家要为发展中国和世界的物理学做出自己出色的贡献：

(1) 迎接 21 世纪物理学的变革与挑战.

(2) 为 21 世纪中国高科技发展提供物理学支撑.

【参考文献】

1　P. Black，G. Drake，L. Jossem 著，赵凯华等译. 物理 2000：进入新千年的物理学. 北京：北京大学出版社，2000

2　国家自然科学基金委员会. 自然科学发展战略调研报告. 北京：科学出版社，1995

3　请关注即将出版的《中国科技中长期发展规划》

4　亚伯拉罕·派斯. 爱因斯坦传（上、下册）. 北京：商务印书馆，2004

5　亚伯拉罕·派斯. 尼耳斯·玻尔传. 北京：商务印书馆，2001

6　大卫·C·卡西第. 海森伯传（上、下册）. 北京：商务印书馆，2002

第 10 章　物理学前沿问题讨论

下面列出各章的思考题与讨论题.

第 1 章　物理学与高科技

1. 试述 21 世纪高科技与物理学的关系.
2. 谈谈你对 21 世纪物理学发展前景和可能面临的变革的看法.

第 2 章　凝聚态物理学与介观物理学

1. 试述凝聚态物理学研究的几个新方向.
2. 谈谈你对介观物理、团簇物理与纳米科技的学习心得.
3. 谈谈核聚变问题.
4. 谈谈超晶格、准晶格与人造原子等人造系统的应用前景.
5. 谈谈极端条件下的凝聚态物理学.
6. 谈谈自己对复杂性与自组织的理解.

第 3 章　原子、分子物理学与光学

1. 谈谈原子结构与原子动力学的前沿问题.
2. 谈谈分子结构与分子动力学的前沿问题.
3. 试述原子的控制与操作和分子的剪切与原子的组装.
4. 试述光学的进展和前沿问题.

第 4 章　原子核物理学

1. 试述低能原子核物理学中的结构、反应、裂变与衰变问题.
2. 试述当前核物理研究的两个前沿：放射性核物理与基于 QCD 的核物理.
3. 试述高能原子核物理学的发展前景.
4. 谈谈你对天体核物理学的展望.

第 5 章　基本粒子物理学与量子场论

1. 试述基本粒子物理学的成就.
2. 试述标准模型的问题.
3. 谈谈你对引力量子化和超弦理论的看法.
4. 试述粒子物理学与原子核物理学的交叉.

5. 试述粒子物理学与宇宙学的关联.

第 6 章　广义相对论、天体物理学与宇宙学

1. 阐述宇宙的层次结构.
2. 谈谈黑洞与类星体问题.
3. 简述经典宇宙学模型和大爆炸（量子）宇宙学模型.
4. 谈谈你对宇宙的加速膨胀与暗物质、暗能量的看法.
5. 谈谈宇宙学问题与粒子物理学问题的关联.

第 7 章　量子信息、量子通讯与量子计算

1. 阐述量子力学与信息论的关系.
2. 试述量子信息与经典信息的区别.
3. 试述量子通讯的特点.
4. 阐述量子计算的特点及其与经典计算的区别.
5. 谈谈你对量子通讯和量子计算机的展望.

第 8 章　生物物理学

1. 谈谈生物学与物理学的交叉问题.
2. 谈谈你感兴趣的生物物理学问题.
3. 试述生物系统的层次性与复杂性.
4. 试述生物信息学的主要课题.
5. 谈谈生物物理学的发展前景.

第 9 章　21 世纪的物理学

1. 谈谈 21 世纪物理学可能面临的变革.
2. 谈谈物理学的研究方法，以及物理学、数学与哲学的关系.
3. 如何发展中国的物理学?
4. 你打算在哪个学科从事物理学教学与研究? 你有什么抱负和理想?

参考书目

1 张礼．近代物理学进展．北京：清华大学出版社，1997
2 张礼，葛墨林．量子力学的前沿问题．北京：清华大学出版社，2000
3 曾谨言．量子力学前沿问题（第一辑）．北京：科学出版社，2000
4 曾谨言，龙桂鲁，裴寿镛．量子力学新进展．北京：清华大学出版社，2003
5 冯端，金国钧．凝聚态物理学新论．上海：上海科学技术出版社，1992
6 冯端，金国钧．凝聚态物理学（上卷）．北京：高等教育出版社，2003
7 章立源．超导理论．北京：科学出版社，2003
8 P. Black，G. Drake，L. Jossem 著，赵凯华等译．物理 2000：进入新千年的物理学．北京：北京大学出版社，2000
9 丁一宾．统一之路：90 年代理论物理前沿课题．长沙：湖南科学技术出版社，1997
10 李喜光．21 世纪末 100 个科学难题．长春：吉林人民出版社，1998
11 美国国家科学院．科学前沿：Ⅰ，Ⅱ卷．国家自然科学基金委员会，1993
12 王顺金．高等量子论与量子多体理论．成都：四川大学出版社，2004

物理学前沿问题

FRONTIER TOPICS IN PHYSICS

责任编辑　王 锋

封面设计 MECD



ISBN 7-5614-3009-4/O・95

定价：25.00元

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝研究生系列教材　物理学前沿问题
作者＝王顺金著
页数＝１５２
ＳＳ号＝１１４０２７５６
ＤＸ号＝
出版日期＝２００５年０１月第１版
出版社＝四川大学出版社